

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO  
FIZIKA JEDRA IN OSNOVNIH DELCEV

Miha Dagarin

**OPTIMIZACIJA ČITALNEGA SISTEMA ZA  
KARAKTERIZACIJO SILICIJEVIH  
FOTOPOMNOŽEVALK**

Magistrsko delo

MENTOR: izr. prof. dr. Rok Pestotnik

Ljubljana, 2024



## Zahvale

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Roku Pestotniku za vse napotke, nasvete in opombe pri izdelavi magistrskega dela. Najlepša hvala tudi dr. Andreju Seljaku za vso pomoč pri eksperimentalnem delu naloge. Zahvaljujem pa se tudi moji družini in bližnjim za vso podporo na moji študijski poti.



# Optimizacija čitalnega sistema za karakterizacijo silicijevih fotopomnoževalk

## IZVLEČEK

Za detekcijo svetlobe v eksperimentih visokoenergijske fizike potrebujemo senzorje, ki so sposobni zaznavati posamezne fotone z velikim izkoristkom in časovno ločljivostjo. Ena od možnosti so silicijeve fotopomnoževalke, ki pa v okoljih z močno sevalno obremenitvijo zaradi poškodb v kristalni strukturi materiala čedalje slabše delujejo. V tej magistrski nalogi sem želel vzpostaviti merilni sistem za določanje časovne ločljivosti silicijevih fotopomnoževalk za potencialno primerjavo rezultatov med sevalnimi eksperimenti. Pri tem so pomembne elektronske komponente uporabljene pri oblikovanju signala fotonov. Primerjal sem različne ojačevalce signala in obliko njihovih izhodnih signalov. Sistem omogoča časovno ločljivost silicijevih fotopomnoževalk pri različnih napajalnih napetostih. Med delom sem optimiziral in ocenil prispevke k napaki meritev.

**Ključne besede:** silicijeve fotopomnoževalke, polprevodniški detektorji, posamezni fotoni, ojačevalci, časovna ločljivost



# Optimization of the readout system for characterization of silicon photomultipliers

## ABSTRACT

For detection of light in high-energy physics experiments, we need sensors capable of detecting individual photons with high efficiency and time resolution. One possibility are silicon photomultipliers, but in strongly irradiated environments their performance decreases due to damage in the crystal structure. In this master's thesis, I wanted to prepare a measurement system for determining the time resolution of silicon photomultipliers for potential future radiation experiments. It is important which electronic components are used to form the photon signal. I compared different signal amplifiers and their output signal shapes. The system is able to measure time resolution of silicon photomultipliers at different supply voltages. During the work, I optimized and evaluated the contributions to the measurement error.

**Keywords:** silicon photomultipliers, semiconductor detectors, single photons, amplifiers, time resolution





# Kazalo

Seznam slik . . . . .	11
Seznam tabel . . . . .	15
<b>1 Uvod . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2 Fizikalni procesi pri zaznavi svetlobe v polprevodnikih . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>3 Zaznavanje fotonov . . . . .</b>	<b>23</b>
3.1 Detektorji posameznih fotonov pred silicijevimi fotopomnoževalkami . . . . .	23
3.1.1 Fotopomnoževalka . . . . .	23
3.1.2 Polprevodniški detektorji . . . . .	24
3.2 Silicijeve fotopomnoževalke . . . . .	28
3.2.1 Signal silicijevih fotopomnoževalk . . . . .	31
3.2.2 Sevalne poškodbe silicijevih fotopomnoževalk . . . . .	32
3.3 Ojačevalniki . . . . .	36
<b>4 Opis merilnega sistema . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1 Izhodišča in hipoteze . . . . .	39
4.2 Priprava eksperimenta . . . . .	39
4.2.1 Ojačanje in zajemanje signala . . . . .	43
4.3 Analiza posnetih signalov . . . . .	46
<b>5 Potek eksperimenta in rezultati . . . . .</b>	<b>51</b>
5.1 Potek . . . . .	51
5.2 Rezultati . . . . .	52
5.2.1 Primerjava med ojačevalci in oblikami signalov . . . . .	52
5.2.2 Primerjava višine signala in časovne ločljivosti . . . . .	55
5.2.3 Uporaba kompenzatorja v merilnem sistemu . . . . .	59
5.2.4 Primerjava analiznih korakov . . . . .	61
<b>6 Zaključek . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>7 Literatura . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>Dodatek A Slike prileganj dvojne Gaussove funkcije . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>Dodatek B Primerjave oblike signalov pri ojačevanju s kompenzatorjem . . . . .</b>	<b>77</b>



# Seznam slik

2.1	Energijski nivoji . . . . .	20
2.2	Izpraznjeno območje p-n spoja . . . . .	20
2.3	Krivulja I-V karakteristike . . . . .	21
3.1	Fotopomnoževalka . . . . .	23
3.2	Kvantni izkoristek fotopomnoževalk . . . . .	24
3.3	PIN fotodioda. . . . .	25
3.4	Plazovna fotodioda. . . . .	25
3.5	Pogostost temnih sunkov za SPAD . . . . .	27
3.6	Silicijeva fotopomnoževalka . . . . .	28
3.7	Verjetnost za Geigerjevo razelektritev . . . . .	29
3.8	Učinkovitost zaznavanja fotonov . . . . .	29
3.9	PDE v odvisnosti od temperature . . . . .	30
3.10	Temperaturna odvisnost DCR . . . . .	31
3.11	Optični presluh in zakasnjena signal . . . . .	31
3.12	Oblika signala silicijeve fotopomnoževalke za posamezne fotone . . . . .	32
3.13	Časovna ločljivost SiPM . . . . .	33
3.14	Pogostost temnih sunkov pred obsevanjem z nevtroni in po njem . . . . .	34
3.15	Pogostost temnih sunkov v odvisnosti od fluence . . . . .	34
3.16	Operacijski ojačevalnik . . . . .	36
3.17	Primer frekvenčnega odziva ojačanja . . . . .	37
3.18	Primer frekvenčnega odziva s kompenzacijo . . . . .	37
3.19	Primer časovnega odziva ojačevalnika na delta funkcijo . . . . .	38
4.1	Silicijeve fotopomnoževalke . . . . .	40
4.2	PCB ploščice . . . . .	41
4.3	Primer neojačanega signala . . . . .	42
4.4	Skica merilnega sistema . . . . .	42
4.5	Primer signala posameznih fotonov . . . . .	43
4.6	Meritev z analizatorjem . . . . .	44
4.7	Shema in postavitve kompenzatorja v merilnem sistemu . . . . .	45
4.8	Primer zajetega signala z DRS4 . . . . .	45
4.9	Uporabniški vmesnik . . . . .	46
4.10	Primer porazdelitve po ploščini pod grafom in porazdelitve po razliki časovnih točk . . . . .	47
4.11	Primer 2D histograma in časovne porazdelitve posameznih fotonov . . . . .	48
4.12	Primer časovne analize signala SiPM in določanje ploščine pod grafom . . . . .	48
4.13	Primer linearne regresije na signalu SiPM . . . . .	49
4.14	Primer uporabe nizkofrekvenčnega filtra na signalu SiPM . . . . .	49
4.15	Primer prilaganja Gaussove funkcije in določanje FWHM . . . . .	50

5.1	Ojačevalec amp3rd in njegov izhodni signal . . . . .	52
5.2	Ojačevalec amp4ch in njegov izhodni signal . . . . .	52
5.3	Ojačevalec ampCN in njegov izhodni signal . . . . .	53
5.4	Ojačevalec KETEK in njegov izhodni signal . . . . .	53
5.5	Ojačevalec new30db in njegov izhodni signal . . . . .	53
5.6	Ojačevalec new40db in njegov izhodni signal . . . . .	54
5.7	Frekvenčni odziv vseh ojačevalcev . . . . .	54
5.8	Frekvenčni odziv ojačevalca amp4ch skupaj z kompenzatorjem . . . . .	55
5.9	Višina signalov SiPM za posamezne fotone . . . . .	56
5.10	Višina signalov SiPM pri osvetlitvi z veliko svetlobe . . . . .	56
5.11	Časovna ločljivost PM1125 v odvisnosti od napetosti . . . . .	57
5.12	Časovna ločljivost PM3315 v odvisnosti od napetosti . . . . .	57
5.13	Časovna ločljivost PM3335 v odvisnosti od napetosti . . . . .	58
5.14	Časovna ločljivost PM3347 v odvisnosti od napetosti . . . . .	58
5.15	Časovna ločljivost pri meritvah s kompenzatorjem za PM1125 . . . . .	59
5.16	Primer oblike signala za PM1115 brez in s kompenzatorja . . . . .	60
5.17	Časovna ločljivost pri meritvah s kompenzatorjem za SiPM proizva- jalca KETEK . . . . .	60
5.18	Časovna ločljivost izračunana po metodi diskriminacije pri konstan- tnem deležu višine . . . . .	61
5.19	Časovna ločljivost izračunana po metodi diskriminacije pri konstantni višini . . . . .	62
5.20	Metode določanja časovne točke . . . . .	62
5.21	Sprememba časovne ločljivosti pri različnih frekvencah vzorčenja DRS4 . . . . .	63
5.22	Prilaganje Gaussove in dvojne Gaussove funkcije . . . . .	64
5.23	Časovna ločljivost pri uporabi nizkofrekvenčnega filtra . . . . .	65
5.24	Časovna ločljivost sistema . . . . .	66
A.1	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM1125 . . . . .	71
A.2	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3315 . . . . .	72
A.3	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3335 . . . . .	72
A.4	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3347 . . . . .	73
A.5	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednosti komponent kompenzatorja . . . . .	73
A.6	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednosti komponent kompenzatorja KETEK . . . . .	74
A.7	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih višin metode diskriminacije pri konstantnem deležu višine . . . . .	74
A.8	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih višin metode diskriminacije pri konstantni višini . . . . .	75
A.9	Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih načinov za določanje časovne točke prihoda signala SiPM . . . . .	75

A.10 Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih frekvencah vzorčenja GSpS . . . . .	76
A.11 Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednostih nizkofrekvenčnega filtra . . . . .	76
B.1 Obliki signalov pri meritvi PM1115 s kompenzatorjem 1 . . . . .	77
B.2 Obliki signalov pri meritvi PM1115 s kompenzatorjem 2 . . . . .	77
B.3 Oblika signala pri meritvi PM1115 s kompenzatorjem 3 . . . . .	78
B.4 Oblika signala pri meritvi PM1125 brez kompenzatorja . . . . .	78
B.5 Obliki signalov pri meritvi PM1125 s kompenzatorjem . . . . .	78
B.6 Oblika signala pri meritvi PM3315 brez kompenzatorja . . . . .	79
B.7 Obliki signalov pri meritvi PM3315 s kompenzatorjem . . . . .	79
B.8 Oblika signala pri meritvi PM3335 brez kompenzatorja . . . . .	79
B.9 Obliki signalov pri meritvi PM3335 s kompenzatorjem . . . . .	80
B.10 Oblika signala pri meritvi PM3347 brez kompenzatorja . . . . .	80
B.11 Obliki signalov pri meritvi PM3347 s kompenzatorjem . . . . .	80



# Seznam tabel

4.1	Uporabljene silicijeve fotopomnoževalke . . . . .	40
4.2	Uporabljeni ojačevalci signala . . . . .	44





# 1. Uvod

Detektorji svetlobe imajo v fizikalnih eksperimentih nalogo zaznavanja fotonov, ki nastajajo v jedrskih in fizikalnih reakcijah. Imajo pomembno vlogo v eksperimentalni fiziki in so od svoje prve uporabe v prvi polovici 20. stoletja močno napredovali. Njihova naloga je pretvoriti zaznane fotone v elektrone in te v električni tok, ki ga nato izmerimo kot signal. V mnogih reakcijah nastane le po nekaj fotonov, zato pri eksperimentih s takimi reakcijami potrebujemo detektorje, ki so sposobni zaznavati posamezne fotone. Fotodetektorji lahko za detekcijo svetlobe uporabljajo različne mehanizme, nas pa zanimajo tisti, ki uporabljajo fotoelektrični učinek. Fotoni, ki jih želimo zaznati, priletijo do detektorja, in iz njega izbijejo elektrone. Ker signala majhnega števila elektronov z elektronskimi vezji ne moremo zaznati, ga je treba ojačiti. Detektorji za to uporabljajo učinek pomnoževanja, tako da iz enega ustvarijo veliko število elektronov, pri tem nastali tok pa se lahko meri. Primer takega detektorja je vakuumška fotopomnoževalka. Glavni poudarek te magistrske naloge pa so polprevodniški detektorji, imenovani silicijeve fotopomnoževalke (SiPM).

SiPM se uporabljajo na številnih področjih. Kot primer komercialne uporabe lahko navedemo tehnologijo zaznavanja in določanja razdalje svetlobe (ang. light detection and ranging – LiDAR) pri samovozečih vozilih in sistemih 3D skeniranja za določanje razdalje. Laser izstreli žarek, ki se nato odbije od predmeta do merilnega sistema in ta izračuna prepotovani čas prejetih fotonov, iz česar pa lahko določimo oddaljenost predmeta. Pri tem imamo veliko količino fotonov različnih valovnih dolžin (od vidne pa do infrardeče svetlobe) in časovna natančnost signala prejetih fotonov znaša manj kot nanosekunda [1]. Na drugi strani pa lahko navedemo še področje, kjer nastane malo fotonov: v medicini silicijeve fotopomnoževalke zamenjujejo drage vakuumške fotopomnoževalke za zaznavanje pozitronov pri pozitronski emisijski tomografiji (ang. positron emission tomography – PET), ki se lahko uporablja za odkrivanje raka. Bolniku se v telo vbrizga fluorodeoksiglukoza (FDG), ki vsebuje radioaktivni izotop fluora  $^{18}\text{F}$ . Ta se kopiči v delih telesa, kjer metabolizem poteka hitreje, in tam z  $\beta^+$  razpadom nastane pozitron, ki se nato izniči z elektronom. Pri tem nastaneta dva  $\gamma$  žarka, ki ju lahko detektiramo.

V eksperimentih visokoenergijske fizike nameravajo uporabiti silicijeve fotopomnoževalke v trkalnikih za detekcijo delcev in na vesoljskih teleskopih za odkrivanje kozmičnih žarkov. Primer takega detektorja je eksperiment LHCb v CERN-u. Eden izmed njegovih sestavnih delov je sistem za ločevanje nabitih hadronov RICH, ki delce identificira z efektom Čerenkova. Fotoni Čerenkova nastanejo, ko delec prileti skozi snov (plin ali aerogel) s hitrostjo, ki presega hitrost svetlobe v tej snovi. Fotone Čerenkova trenutno zaznavajo z večanodnimi fotopomnoževalkami, ki bi jih lahko silicijeve fotopomnoževalke zamenjale [2]. Te so namreč enostavnejše za uporabo, magnetno polje na njih ne vpliva, omogočajo segmentacijo na manjše kanale – kar izboljša prostorsko ločljivost – in imajo enako ali celo boljšo časovno ločljivost. Ven-

dar pa so v takih okoljih detektorji močno sevalno obremenjeni – prejmejo ogromne količine sevanja, ki lahko poškodujejo strukturo polprevodnika, tako da se detektor pokvari ali pa spremeni svoje lastnosti. Pri trenutni nadgradnji detektorja LHC se bo količina sevanja v detektorju povečala z manj kot  $10^{12}$  delcev/cm<sup>2</sup> na več kot  $10^{14}$  delcev/cm<sup>2</sup> [3]. Za preučevanje vpliva sevanja na spremembe v lastnostih detektorja, je treba ugotoviti, kakšna je najboljša kombinacija elektronike in eksperimentalnega okolja, v katerem se izbrane lastnosti preučuje in primerja. Cilj je bil primerjati dane ojačevalce in izbrati najboljšega. V poglavju 2 bo razloženih nekaj fizikalnih pojavov, ki nam bodo koristili pri preučevanju silicijevih fotopomnoževalk, v poglavju 3 pa bo predstavljene nekaj njihove zgodovine in lastnosti, opisana pa bosta tudi vloga in delovanje ojačevalcev. V poglavju 4 bodo predstavljene hipoteze, priprava eksperimenta in postopek analize, v poglavju 5 pa potek eksperimenta in njegovi rezultati: primerjava eksperimentalnih podatkov in v eksperimentu uporabljenih ojačevalcev.

## 2. Fizikalni procesi pri zaznavi svetlobe v polprevodnikih

Detekcija fotonov je mogoča le, če ti interagirajo s snovjo. V nadaljevanju opisani detektorji za zaznavanje svetlobe uporabljajo fotoelektrični pojav. Foton, ki je nastal pri reakciji, prileti v detektor, pri čemer foton in elektron snovi detektorja interagirata. Pri tem trku vpadni foton preda vso svojo energijo elektronu, a da do fotoefekta sploh lahko pride, mora biti energija fotona višja od vezavne energije elektrona (npr. vezavna energija elektrona v kristalu silicija je 1,12 eV). Če je energija fotona dovolj visoka, bo lahko izbiti fotoelektron prihajal tudi iz bolj notranjih orbital snovi. Glede na to, kam izbiti elektron odleti, ločimo zunanji in notranji fotoefekt. V primeru, da elektron snov zapusti, govorimo o zunanjem fotoefektu, če pa elektron v snovi ostane, govorimo o notranjem fotoefektu. Slednji omogoča detektiranje fotonov v silicijevih fotopomnoževalkah.

Za razumevanje notranjega fotoefekta v polprevodnikih moramo prej predstaviti energijske nivoje v polprevodnikih in njihovo prevodnost. V polprevodnikih elektrone glede na njihovo energijo razporedimo na različne nivoje. V čistem polprevodniku se elektroni nahajajo v valenčnem pasu, nad njim pa je prevodni pas. V tem ni elektronov, ampak samo prazna mesta, ki jih imenujemo vrzeli, kar pa je v resnici samo lokalno pomanjkanje elektronov. Te lahko ravno tako delujejo kot nosilci pozitivnega naboja. Razliko med tema dvema nivojema imenujemo energijska reža in je enaka energiji, ki jo moramo dovesti elektronu, da preide iz valenčnega v prevodni pas. Ko se to zgodi, polprevodnik začne prevajati električni tok. Enako to pomeni za vrzeli, če preidejo iz prevodnega v valenčni pas [4].

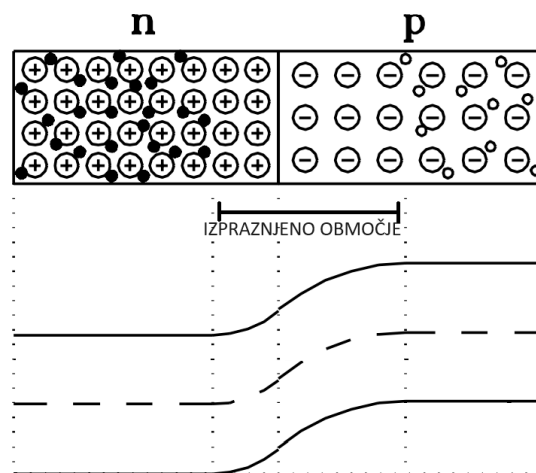
Polprevodnike lahko tudi dopiramo: čistemu polprevodniku se doda atome snovi, ki ima drugačno število valenčnih elektronov. Če siliciju (število valenčnih elektronov 4) dodamo primesi antimona (5 valenčnih elektronov), smo v polprevodnik vnesli atome, ki imajo en dodatni elektron več kot okolica in jih imenujemo donorji. Ti predstavljajo nov energijski nivo donorjev, ki je napolnjen z elektroni in je blizu prevodnega pasu, zato je za prehod čez energijsko špranjo potrebno manj energije, polprevodnik pa je posledično bolj prevoden. Ta postopek imenujemo dopiranje tipa n. Če pa siliciju dodamo primesi galija (3 valenčni elektroni), smo v polprevodnik vnesli atome, ki imajo en elektron manj kot okolica. Zaradi manjkajočega elektrona nastane vrzel, ki lahko elektron sprejme. Zato take atome imenujemo akceptorji. Ti tvorijo energijski nivo nad valenčnim pasom, ki pripomore, da elektroni v ta pas lažje preskočijo in ob tem za seboj pustijo vrzel. To se imenuje dopiranje tipa p [4]. Grafična predstavitev energijskih nivojev je na sliki 2.1.

Če oba tipa polprevodnika združimo, nastane p-n spoj. V njem začnejo vrzeli iz p-tipa z difuzijo prehajati v n-tip, elektroni pa, nasprotno, iz n-tipa v p-tip. Tako se lahko vrzeli in elektroni rekombinirajo, nosilci naboja se izničijo, zato nastane



Slika 2.1: Energijski nivoji – na sredini: v čistem polprevodniku; levo: v n-tipu dopiranega polprevodnika, kjer donorji tvorijo nov energijski pas blizu prevodnega; desno: v p-tipu dopiranega polprevodnika, kjer akceptorji tvorijo nov energijski pas blizu valenčnega. Povzeto po [4].

območje brez nosilcev naboja, kar imenujemo izpraznjeno območje (glej sliko 2.2). Na eni strani te plasti ostanejo akceptorji – atomi, ki so prej imeli manj elektronov kot osnovni atomi polprevodnika in so po rekombinaciji pridobili višek elektronov, zato je ta stran bolj negativno nabita. Na drugi strani pa ostanejo donorji, ki so imeli več elektronov, sedaj pa jih imajo manj in je zato ta stran postala bolj pozitivno nabita. V tem območju se ustvari električno polje, ki ga lahko povečamo, če p-n spoj priklopimo na električno napetost [4].

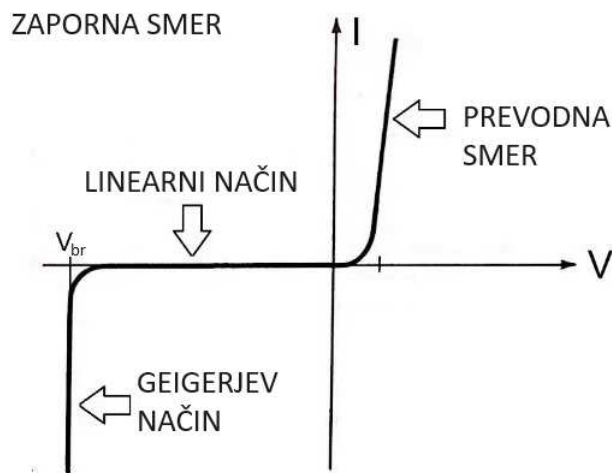


Slika 2.2: Izpraznjeno območje p-n spoja. Na sredini spoja se z difuzijo ustvari območje brez nosilcev naboja. Spodaj je prikazan potek energijskih nivojev skozi spoj. Povzeto po [4].

Električno napetost lahko priključimo v prevodni smeri (p-tip na pozitivno stran in n-tip na negativno) ali pa v zaporni smeri (obratno). V prevodni smeri nosilci naboja (elektroni v n-tipu in vrzeli v p-tipu) tečejo po polprevodniku. Elektroni se iz n-tipa pomikajo proti p-tipu in vanj lahko preskočijo, ker je izpraznjeno območje dovolj ozko. Tu je zanje energijsko bolj ugodno, da se rekombinirajo s prostimi vrzeli, kot pa da bi tekli naprej po p-tipu. Podobno velja za vrzeli, ki preidejo v n-tip. Tok elektronov in vrzeli je enak, zato skozi polprevodnik električni tok teče.

Za detekcijo svetlobe moramo p-n spoj priključiti na napetost v zaporni smeri. Vrzeli v p-tipu v tem primeru zaradi negativne napetosti vleče stran od spoja, ravno tako elektrone v n-tipu. To se pokaže kot razširitev zgoraj opisanega izpraznjenega

območja. S tem se poveča energija, ki je potrebna, da lahko nosilci naboja to območje preskočijo. Večja kot je napetost na spoju, širše bo izpraznjeno območje in tudi električno polje bo močnejše. Znotraj tega območja se lahko zaradi fotoefekta ali pa termičnih ekscitacij pojavi elektron, ki se začne gibati v smeri električnega polja. Če je napetost dovolj visoka, da elektron pospešuje in pridobiva energijo, lahko ob trku z atomi polprevodnika izbije elektrone iz valenčnega pasu. Ti se nato ravno tako začnejo pospešeno gibati in izbijati dodatne elektrone, tako da na koncu iz začetnega elektrona dobimo plaz velikega števila elektronov. Ta postopek imenujemo pomnoževanje; velikost pomnoževanja je odvisna od napajalne napetosti. Sprva se pomnoževanje povečuje linearno, ko pa je dosežena pragovna napetost  $V_{br}$  (ang. breakdown voltage), se odziv spremeni iz linearne v eksponentnega. Tak način delovanja imenujemo Geigerjev način (glej sliko 2.3).



Slika 2.3: Krivulja I-V karakteristike p-n spoja. V zaporni smeri po doseženi  $V_{br}$  spoj preide v Geigerjev način delovanja. Povzeto po [5].



## 3. Zaznavanje fotonov

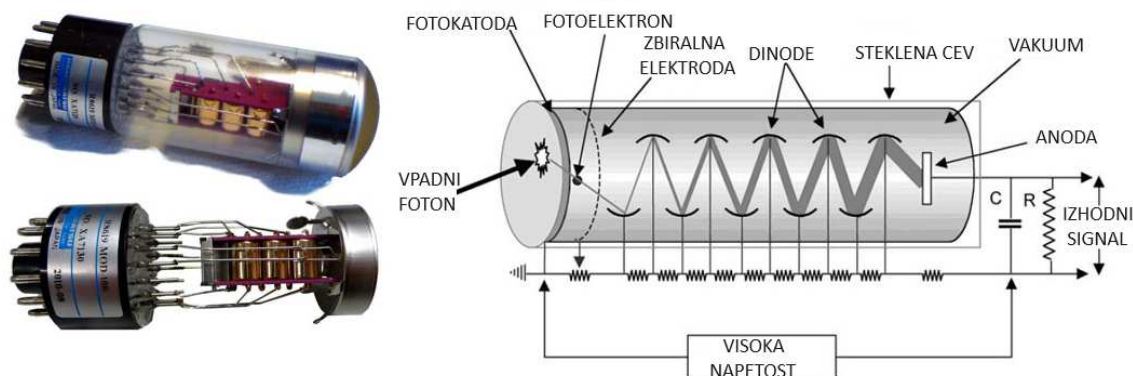
### 3.1 Detektorji posameznih fotonov pred silicijevimi fotopomnoževalkami

Preden začnemo z opisom silicijevih fotopomnoževalk, si najprej pogledjmo detektorje, ki so s svojim razvojem prispevali k osnovanju SiPM. Za tem si bomo pogledali še operacijske ojačevalnike, ki so pomembni pri ojačitvah signalov pozameznih fotonov.

#### 3.1.1 Fotopomnoževalka

Prvi detektor, ki je za zaznavanje svetlobe uporabljal fotoelektrični pojav, je bila fotopomnoževalka (ang. Photomultiplier tube – PMT). Sestavljena je iz vakuumsko zaprte cevi (velikosti nekje med 1 in nekaj 10 cm, lahko pa vse do pol metra), v kateri so fotokatoda, več dinod in anoda (slika 3.1). Glede na vrsto katode lahko PMT zaznava fotone različnih valovnih dolžin. Ko vpadni foton zadene katodo, ta preko fotoefekta odda elektron, ki ga imenujemo primarni. Ta elektron se usmeri do prve dinode. Med katodo in dinodo je prisotno močno električno polje, ki elektron pospeši, kar mu zagotovi dovolj energije, da iz dinode izbije več elektronov, ki jih imenujemo sekundarni. Ti zdaj potujejo do druge dinode in vsak elektron izbije več elektronov (to imenujemo pomnoževalni učinek), tako da po (običajno) 10 dinodah dobimo tok okoli  $10^6$  elektronov, ki ga nato ujamemo in izmerimo na anodi. Lastnost pomnoževanja, ki nam pove, kolikšen tok elektronov dobimo iz enega primarnega elektrona, se imenuje izplen  $G$  in je eksponentno odvisna od števila dinod  $n$  ter števila sekundarnih elektronov  $g$ , ki jih dobimo iz enega primarnega.

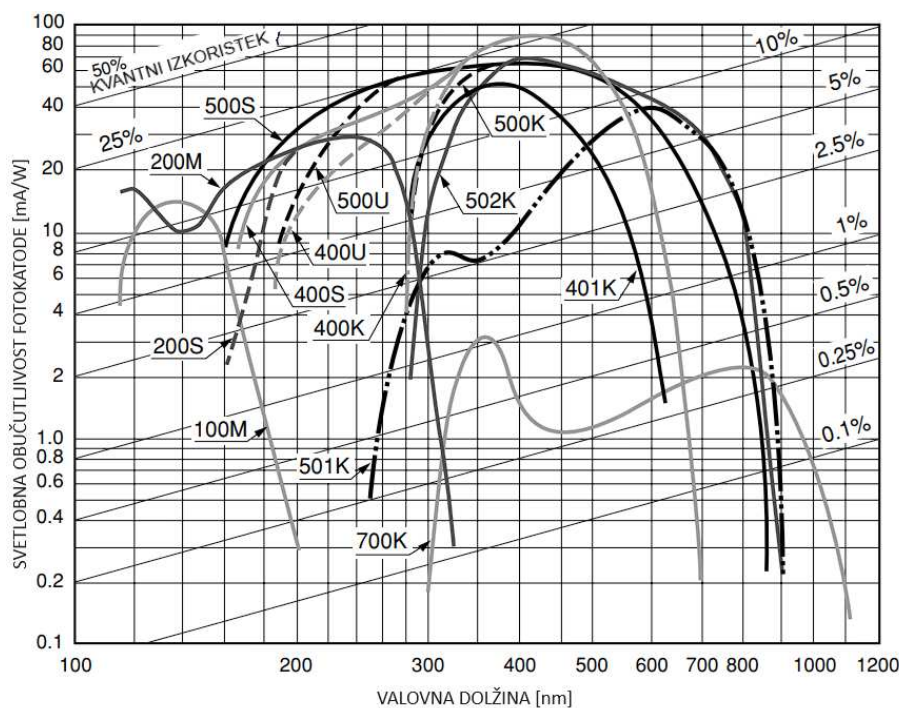
$$G = g^n \quad (3.1)$$



## Poglavje 3. Zaznavanje fotonov

PMT je bil prvi detektor, ki je za zaznavanje delcev uporabljal pomnoževalni učinek. S tako velikim pomnoževanjem je mogoče zaznavati že posamezne fotone. PMT ima relativno hiter odzivni čas in dobro časovno ločljivost (okoli nanosekunde). Sposoben je zaznavati fotone na širokem območju valovne dolžine; lastnost, ki opisuje, kako učinkovito detektor fotone absorbira glede na njihovo valovno dolžino, imenujemo kvantni izkoristek  $QE$  (slika 3.2). PMT ima malo signalov šuma (signalov, ki jih ne želimo izmeriti), ki so lahko posledica termičnih emisij iz fotokatode – večja katoda pomeni več šuma – ali pa uhajalnega toka med anodo in elektrodami znotraj fotopomnoževalke. Več bo o šumu povedano v naslednjem poglavju, ker za polprevodniške detektorje šum predstavlja večji problem.

Vse zgoraj naštetu so razlogi, da se fotopomnoževalke v eksperimentih (npr. Kamiokande) še vedno uporabljajo. Imajo sicer nekaj pomanjkljivosti, kot so visoki stroški izdelave in delovanje pri visokih napetostih ( $\sim 1000$  V). Tudi uporaba PMT v magnetnem polju je zelo omejena, saj se sledi elektronov v njem ukrivijo, zaradi česar lahko zaradi tega dinodo zgrešijo, s čimer se izplen zmanjša [7].



Slika 3.2: Kvantni izkoristek (ang. quantum efficiency) fotopomnoževalk. Graf prikazuje odvisnost svetlobne občutljivosti različnih fotokatod. Iz grafa je razvidno, da lahko z različnimi fotokatodami pokrijemo poljubno območje valovnih dolžin, hkrati pa kvantni izkoristek le redko preseže 25 %. Povzeto po [7].

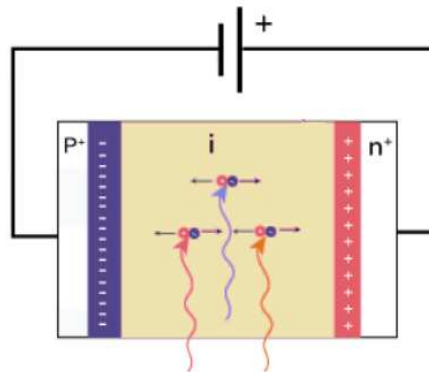
### 3.1.2 Polprevodniški detektorji

Raziskovalci so se v iskanju alternativ za fotopomnoževalke usmerili proti polprevodnikom. Fotodetektorji iz polprevodnikov za pretvorbo fotonov v električni tok uporabljajo p–n spoj. Podobno kot pri PMT vpadni foton izbije elektron zaradi fotoelektričnega pojava. Prvi detektorji te vrste, uporabni za eksperimente, so PIN fotodiode. To so diode, ki za zaznavo fotonov uporabljajo p–n spoj in imajo široko izpraznjeno območje, ki nastane zaradi dodane napetosti v zaporno smer (glej sliko 3.3). Detektor lahko zaznava fotone samo na površini, kjer se izpraznjeno območje



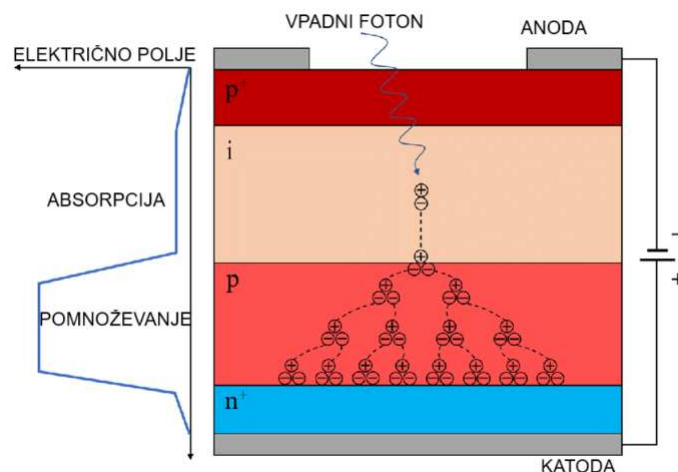
### 3.1. Detektorji posameznih fotonov pred silicijevimi fotopomnoževalkami

nahaja, zato to površino imenujemo aktivna površina [8]. Pomanjkljivost PIN fotodiod je, da vsak foton sproži samo en elektron, kar pomeni, da za merjen signal potrebujemo ogromno fotonov.



Slika 3.3: PIN fotodioda. Njena sestava je podobna p-n spoju, razlika je v napetosti (v zaporni smeri), zato se med p-tipom in n-tipom polprevodnika izpraznjeno območje še razširi. V njem se pojavi električno polje. Fotoni izbijejo elektrone iz atomov izpraznjene plasti; elektroni se potem gibljejo v smeri električnega polja. Povzeto po [8].

Nadgradnja tega detektorja je plazovna fotodioda (ang. Avalanche photodiode – APD), ki, kot že ime pove, uporablja pomnoževalni učinek v obliki plaz. Izbiti elektron se giblje v smeri električnega polja izpraznjene plasti, dokler ne naleti na novo plast p-tipa polprevodnika. V tej plasti se električno polje močno poveča, zato elektron po prihodu vanjo pospešuje in pridobiva energijo. Pri tem se lahko zaleti v atom polprevodnika in iz njega izbije nov elektron, ta pa zopet pospešuje in izbija nove elektrone – tako nastane plaz elektronov (glej sliko 3.4).



Slika 3.4: Plazovna fotodioda in princip detekcije fotonov s pomnoževalnim učinkom. Povzeto po [9].

Izpljen tega detektorja je okrog  $10^2$  elektronov, kar je za zaznavo posameznih fotonov še vedno premalo. Za sprožitev detekcije mora na aktivno površino fotodetektorja pasti več kot en foton, zato za poskuse, kjer se pri eni reakciji ustvari le

majhno število fotonov, tak detektor še ni primeren. Čeprav PIN in APD ne zmoreta detektirati posameznih fotonov, imata pred PMT to prednost, da sta cenejša, manjša (velikosti nekaj mm), robustnejša in neobčutljiva v magnetnem polju. Njuna napajalna napetost je tudi nižja: običajna napajalna napetost je okoli 100 V.

Vendar je zaradi njihove zgradbe za polprevodniške detektorje značilno, da je pri njih šumnih signalov več kot pri fotopomnoževalkah. Poleg običajnega elektronskega šuma (ki je prisoten v vseh elektronskih napravah) k šumu največ prispevajo temni sunki (ang. dark counts). To so neželeni signali, ki motijo delovanje detektorja in slabšajo kakovost meritve, saj niso posledica reakcij, ki jih opazujemo v eksperimentu. Med meritvijo v izpraznjeno plast prileti vpadni foton, ki preko fotoelektričnega pojava izbije elektron, ta pa sproži plaz sekundarnih elektronov in s tem zaznavni signal. Vendar pa se lahko zaradi termodinamičnih fluktuacij v polprevodniku prosti nosilec naboja ustvari (ali pa izpraznjeno območje preskoči) brez zunanega vpliva, nastali elektron pa nato sproži elektronski plaz, ki ga zaznamo kot signal. Težava je, da za sam detektor ni razlike, kaj plaz sproži, zato so signali temnih sunkov videti enako kot signali vpadnih fotonov. Te fluktuacije so močno odvisne od temperature – z njenim višanjem so temni sunki bolj pogosti; prav tako so pogostejši z višanjem napajalne napetosti. Pogostost sprožitve temnih sunkov označujemo z DCR (ang. dark count rate), električni tok, ki ga pri tem ustvarijo, pa imenujemo temni tok (ang. dark current). Pogostost temnih sunkov v fotopomnoževalki redko doseže 10 kHz, medtem ko lahko pri plazovnih fotodiodah pogosto preseže 1 MHz pri sobni temperaturi.

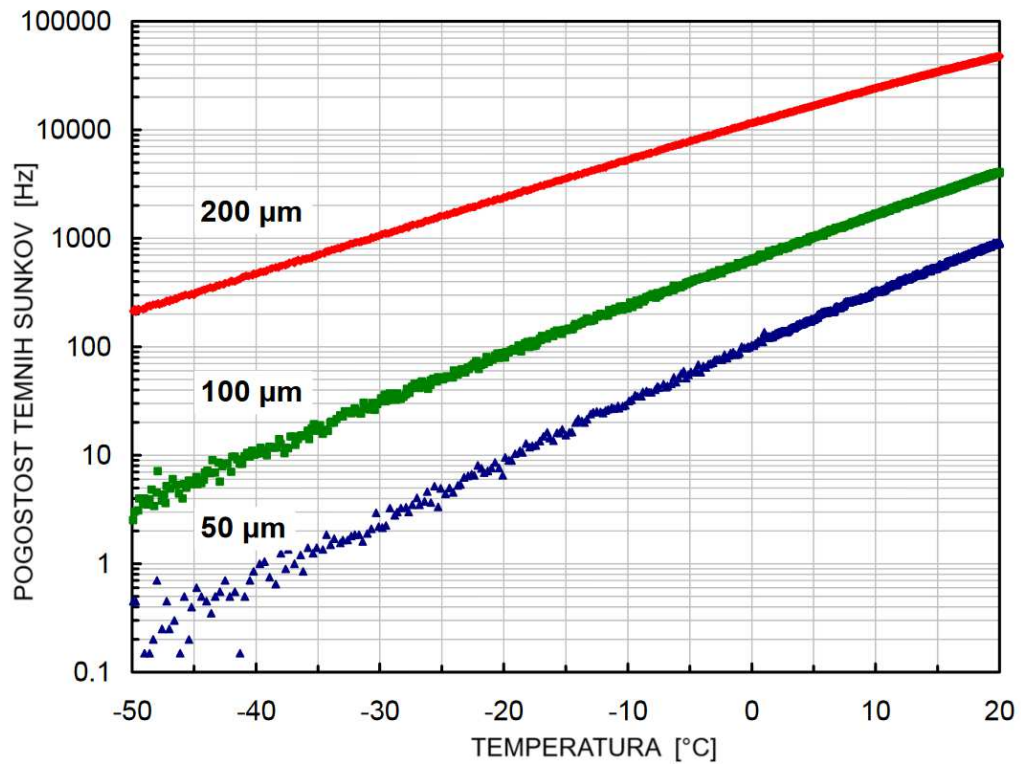
Plazovne fotodiode delujejo v linearnem načinu pomnoževanja: njihov izplen se povečuje z višanjem napajalne napetosti. Naslednja nadgradnja je torej detektor, ki deluje v Geigerjevem načinu: ko napajalna napetost preseže pragovno napetost  $V_{br}$ , pomnoževanje ni več linearno, ampak postane eksponentno. V tem načinu je električno polje znotraj polprevodnika dovolj veliko, zato že en sam foton zadostuje, da iz enega izbitega elektrona nastane plaz do  $10^6$  elektronov. S tem nastane polprevodniški detektor, ki je sposoben zaznavati posamezne fotone. Tak detektor se imenuje plazovna fotodiode, sposobna detekcije posameznih fotonov (ang. Single-photon avalanche diode – SPAD). Ta je veliko manjša od APD (pod 100  $\mu\text{m}$ ), se hitro odziva, končni tok elektronov pa zagotavlja visok signal.

Ker SPAD deluje nad  $V_{br}$  in je v njem visoko električno polje, se signal sproži že zaradi enega fotona. Plaz elektronov, ki nastane, pobere vse proste nosilce naboja v izpraznjenem območju, tako da SPAD več kot enega fotona ne more zaznati. Da se lahko nastali tok elektronov sprosti in detektor izprazni, je potrebno najpriključiti neko električno obremenitev. Zato SPAD zaporedno večemo z uporom, katerega naloga je sprostiti oziroma zadušiti prej nastali plaz toka elektronov (ang. quenching). V času, ko se plaz prazni, detektor ne more zaznavati novih fotonov, zato temu času rečemo mrtvi čas (ang. dead time). Ta je neposredno povezan z stopnjo zaznave detektorja – koliko različnih zaporednih fotonov lahko zaznamo na sekundo (običajno od 100 kHz do več kot 1 MHz). Višji signal zahteva več dušenja in daljši mrtvi čas [10].

Temni sunki so za SPAD velika težava, ker vsaka motnja (foton ali pa elektron termične fluktuacije) sproži maksimalen plaz elektronov, ki delovanje detektorja onemogoči, zaradi česar bi lahko zamudili v eksperimentu nastali foton. Koliko šuma nastane, je odvisno od velikosti detektorja in temperature obratovanja (slika 3.5). Večji volumen polprevodnika pomeni več atomov in posledično večjo verjetnost, da

### 3.1. Detektorji posameznih fotonov pred silicijevimi fotopomnoževalkami

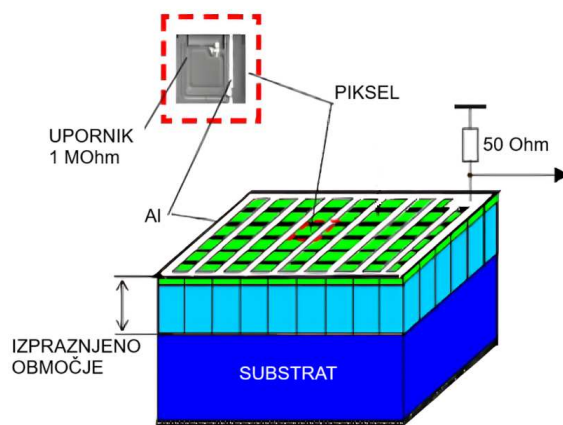
se termodinamične fluktuacije pojavijo – prav zato so SPAD tako majhni. Podobno velja tudi za temperaturo: višja temperatura pomeni več termične energije za elektrone, ki lahko tvorijo fluktuacije [10].



Slika 3.5: Pogostost temnih sunkov (DCR) za tri SPAD različnih velikosti v odvisnosti od temperature. Tako z nižanjem temperature kot tudi z manjšo velikostjo se DCR manjša. Povzeto po [11].

## 3.2 Silicijeve fotopomnoževalke

Silicijeva fotopomnoževalka je matrika SPAD na silicijevem substratu, ki so povezani vzporedno in delujejo nad pragovno napetostjo. Vsak SPAD predstavlja mikrocelico ali piksel (slika 3.6). Posamezen SPAD je lahko velik le nekaj  $10\ \mu\text{m}$  in tudi če jih v matriko postavimo nekaj tisoč, je celotna silicijeva fotopomnoževalka še vedno relativno majhen detektor velikosti nekaj mm. Pod aktivnim območjem vsake celice (površina, s katero SPAD zaznava fotone) se nahaja izpraznjeno območje spoja, kjer se plaz elektronov oblikuje in nato s pomočjo upora (običajno  $50\ \Omega$ ) izprazni. Napajalna napetost silicijeve fotopomnoževalke je bistveno nižja kot pri predhodnih detektorjih, običajno pod  $100\ \text{V}$ , zato je rokovanje z njim precej lažje kot pa npr. s PMT [10].



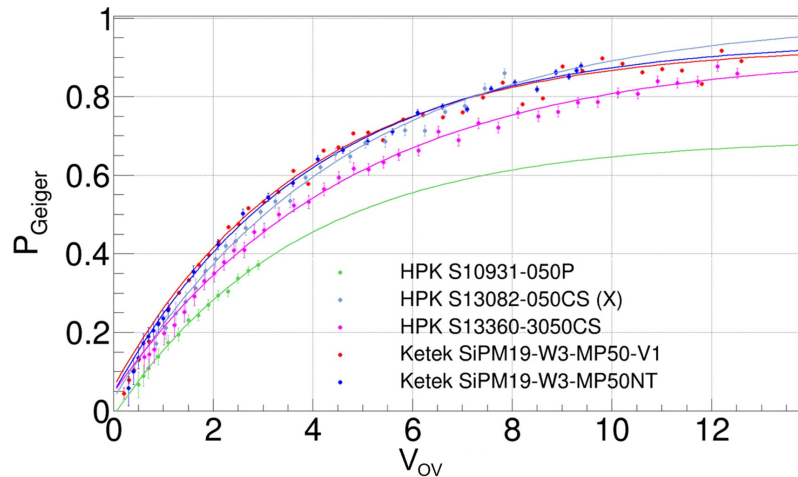
Slika 3.6: PrIMER zgradbe silicijeve fotopomnoževalke. Na silicijev substrat se nanese veliko število vzporedno povezanih SPAD, ki predstavljajo vsak svoj piksel. Za ločevanje je med piksli sloj kovine (npr. aluminija); prIMER piksela je označen z rdečo (velikosti  $\sim 40\ \mu\text{m}$ ). Povzeto po [10]

V silicij se valovne dolžine fotonov ne absorbirajo vse enako, vendar je spektralni razpon absorpcije fotonov pri SiPM večji in drugače kot pri PMT neodvisen od vrste katode. Silicij ima široko območje absorpcije in lahko zazna fotone od UV do infrardeče svetlobe. Na učinkovitost zaznavanja fotonov (ang. photon detection efficiency –  $PDE$ ) poleg kvantne učinkovitosti  $QE$  vplivata še:

- zapolnitveno razmerje (ang. fill factor –  $FF$ ) – ker je silicijeva fotopomnoževalka sestavljena iz več manjših detektorjev – SPAD – celotna površina detektorja ne more biti aktivna. Razmerje med aktivno in celotno površino detektorja imenujemo zapolnitveno razmerje. Ker elektronika piksela zavzema določeno površino, je  $FF$  vedno manjši od 1;
- verjetnost za Geigerjevo razelektritev  $P_{Geiger}$ , kar predstavlja verjetnost sprožitve elektronskega plazu. Tudi če foton pade na aktivno območje detektorja, to še ne zagotavlja, da se bo plaz elektronov sprožil. Ta verjetnost se povečuje z višanjem napetosti nad pragom (glej sliko 3.7).

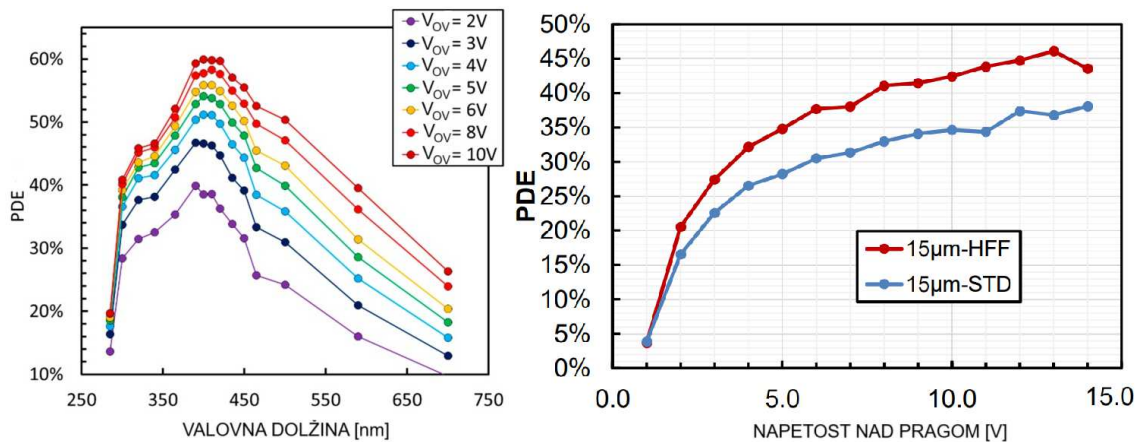
Celoten  $PDE$  se tako izračuna kot:

$$PDE = QE \cdot FF \cdot P_{Geiger}. \quad (3.2)$$



Slika 3.7: Verjetnost za Geigerjevo razelektritev za različne SiPM v odvisnosti od napetosti nad pragom  $V_{ov}$ . Povzeto po [12].

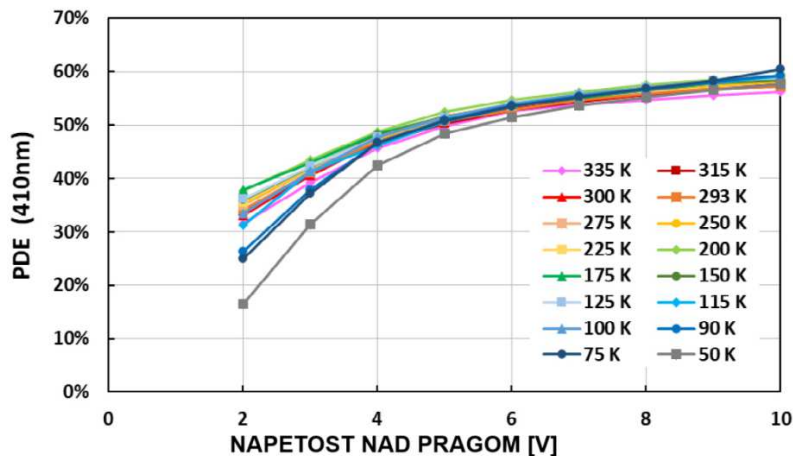
$PDE$  je torej odvisen od valovne dolžine vpadnih fotonov, napetosti nad pragom in velikosti mikrocelice, ki vpliva na zapolnitveno razmerje (glej sliko 3.8). Posredno je učinkovitost zaznavanja fotonov odvisna tudi od temperature, ker se z njo spreminjata pragovna napetost in verjetnost za Geigerjevo razelektritev [12, 13].



Slika 3.8: Učinkovitost zaznavanja fotonov  $PDE$  v odvisnosti od: levo – valovne dolžine svetlobe pri različnih napetostih nad pragom  $V_{ov}$  za isti SiPM; desno – napetosti nad pragom za dva različna SiPM, pri čemer ima HFF boljše zapolnitveno razmerje (61 %) kot STD (52 %). Povzeto po [14].

Silicijeva fotopomnoževalka deluje v Geigerjevem načinu, kar pomeni, da mora biti napajalna napetost nad pragovno napetostjo. Napetost, ki je višja od  $V_{br}$ , se imenuje napetost nad pragom (ang. overvoltage  $V_{ov}$ ). Od nje je odvisnih več lastnosti, saj večja napetost povzroči večji plazovni učinek – boljši izplen, zato se višina zaznanega signala poveča; tudi  $PDE$  se poveča. Od vrste SiPM je odvisno, katera napetost nad pragom je za meritve najbolj optimalna. Ena od prednosti SiPM je dobra časovna ločljivost, nanj ne vpliva magnetno polje, je lahek, robusten, poceni za izdelavo in (v primerjavi z npr. PMT) zelo enostaven za uporabo [10].

Ob vseh svojih prednostih pa silicijeve fotopomnoževalke niso brez težav. Obstajata dve vrsti šuma: koreliran (povezan z absorpcijo fotona) in nekoreliran. K

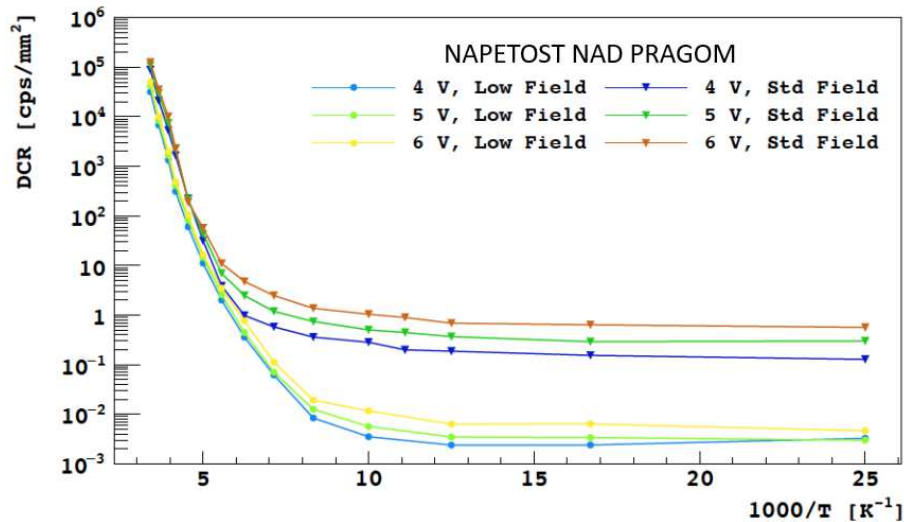


Slika 3.9:  $PDE$  v odvisnosti od napetosti nad pragom pri različnih temperaturah in valovni dolžini 410 nm. Prikazani Povzeto po [13].

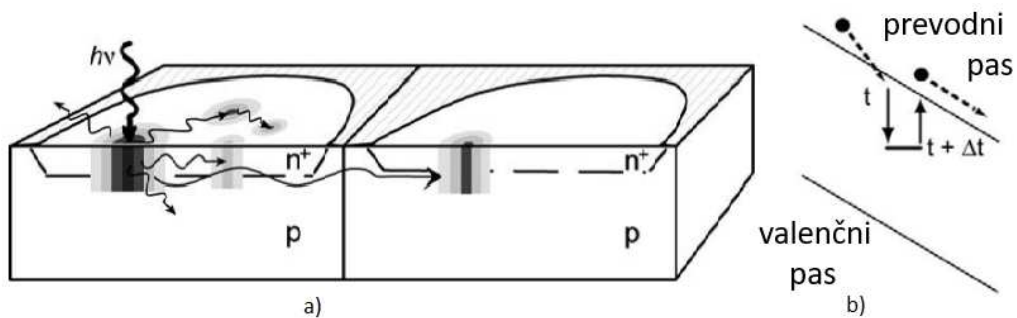
nekoreliranemu šumu največ prispevajo temni sunki. Ti so posledica termodinamičnih fluktuacij in so prisotni tudi, ko detektor ni obsevan s svetlobo. Pri sobni temperaturi je lahko pogostost tega procesa več MHz. Temni tok je odvisen od več dejavnikov, glavna sta velikost (SiPM in mikrocelice) in temperatura. Uporaba višje napetost nad pragom lahko proces še poslabša, celo do te mere, da zasenči foton-ski signal – signal, ki ga želimo meriti. Ker je silicijeva pomnoževalka sestavljena iz mnogo SPAD, temni sunki pa se pojavljajo na vsakem posebej, lahko nekatere slabše mikrocelice poslabšajo delovanje celotnega detektorja [15].

Najučinkovtejša rešitev, kako zmanjšati količino temnih sunkov, je ohladitev detektorja; s tem se zmanjša termična energija elektronov, kar pomeni manjšo verjetnost za fluktuacije (glej sliko 3.10). Vendar pa se s spreminjanjem temperature spremenijo tudi druge lastnosti SiPM, npr. pragovna napetost in izplen. Ena izmed količin, ki vpliva na temni tok, je tudi velikost mikrocelice, saj je količina temnih sunkov neposredno povezana z volumnom silicija. Z manjšo mikrocelico se pogostost sprožitve temnega šuma zmanjša, skrajša se mrtvi čas – se pa s tem zmanjša aktivna površina detektorja, kar poslabša zapolnitveno razmerje  $FF$ .

Vira koreliranega šuma sta optični presluh (ang. optical crosstalk) in zakasnjjen signal (ang. afterpulsing). Slednji nastane, ko se po sproženem elektronskem plazu nosilec naboja ujame pod prevodnim pasom in preide vanj po kratkem zamiku, ko se je glavni plaz že (vsaj delno) izpraznil. Dejansko to podaljša čas obnovitve detektorja – čakalni čas za detektor, preden ta lahko zazna drug foton. Ta problem se lahko minimalizira z zmanjšanjem dobička  $G$  in uporabo kovinskih zlitin z večjo upornostjo za pospešitev dušenja plazu. Optični presluh je posledica majhne velikosti SPAD. Ko foton zadene eno celico, nastali plaz lahko dodatno odda več fotonov, ki sprožijo tudi sosednje celice. To se potem pomotoma zazna kot signal več fotonov, čeprav je bil zadetek zunanega fotona samo eden (glej sliko 3.11). Presluh je mogoče zmanjšati tako, da se med celicami vzpostavi več prostora, vendar to zmanjša zapolnitveno razmerje in posledično  $PDE$ . Eden od načinov ločevanja SPAD je dodajanje jarkov – majhnih kanalov (ang. trenches) iz silicija ali kovin, ki niso pod električnim poljem [14].



Slika 3.10: Graf prikazuje temperaturno odvisnost pogostosti temnih sunkov za dva različna SiPM pri napetostih nad pragom 4–6 V. Na x-osi je označen inverz temperature (sobna temperatura  $\sim 3,5 \text{ K}^{-1}$ , temperatura tekočega dušika (77 K)  $\sim 13 \text{ K}^{-1}$ ). DCR se z višanjem napetosti nad pragom povečuje. Povzeto po [3].

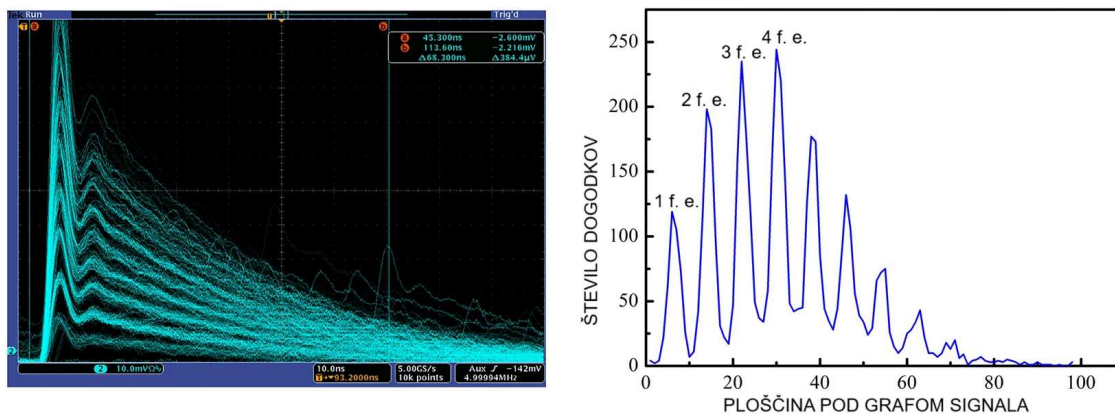


Slika 3.11: a) Optični presluh – plaz v mikrocelici lahko sproži plaz tudi v sosednji; b) zakasnjena signal – po sproženem plazu elektronov se eden izmed njih ujame v energijski nivo pod prevodnim pasom, od kjer lahko po kratkem času preide nazaj v prevodnega in ponovno sproži plaz. Povzeto po [10].

### 3.2.1 Signal silicijevih fotopomnoževalk

Matrična sestava razdeli detektor na posamezne celice in vsaka zase je svoj detektor SPAD. Če smo zaznali en foton, se je sprožila ena celica. Če sta na SiPM padla dva fotona, sta se sprožili dve celici, zato bosta sprožena dva plaza, kar bo povzročilo dvakrat višji zaznani signal (slika 3.12). Tako se z detektorjem pridobi ne le zmožnost zaznave posameznih fotonov, temveč tudi določanje, koliko fotonov je pri obravnavani reakciji nastalo. To izračunamo z integriranjem ploščine pod grafom signala in ta narašča z številom zaznanih fotonov – dvakrat več fotonov pomeni dvakrat večjo ploščino.

V obliki signala silicijeve fotopomnoževalke so pomembne naslednje lastnosti: sprednji rob (ang. leading edge), višina signala in dolžina zadnjega dela – repa. Strmina sprednjega roba je odvisna od sposobnosti pomnoževanja SiPM: bolj strm rob pomeni, da se je elektronski plaz v plasti pomnoževanja detektorja razvil hitreje. Za določanje časovne ločljivosti fotodetektorja izmerimo natančnost porazdelitve



Slika 3.12: Primer signala silicijeve fotopomnoževalke za posamezne fotone. Levo: slika iz osciloskopa, kjer se jasno loči število sproženih celic. Desno: graf porazdelitve izmerjene ploščine pod signalom. Vsak vrh predstavlja dogodke, kjer se je sprožilo določeno število SPAD, kar je enako številu zaznanih fotoelektronov. Povzeto po [16].

sprednjega roba signala [17]. Na sprednjem robu (lahko z različnimi metodami) izberemo časovno točko, ki nam določa čas prihoda fotona in sprožitve elektronskega plazju; izbira časovne točke vpliva na izmerjeno časovno natančnost detektorja.

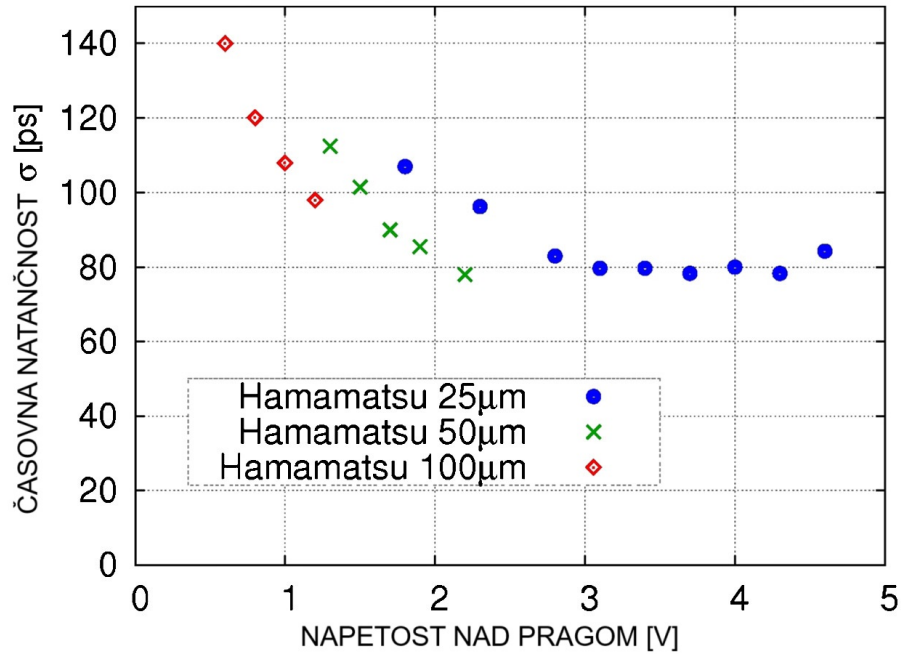
Kot že prej omejeno višina signala sovpada s številom zaznanih fotonov. Višina signala posameznega fotona je povezana z izplenom SiPM: višji signal pomeni višji izplen – pri elektronskem plazju se ustvari več elektronov. Izplen pa je neposredno povezan z napetostjo nad pragom  $V_{ov}$ , ki pa vpliva tudi na časovno ločljivost SiPM (glej sliko 3.13). Izplen se z napetostjo povečuje linearno – to linearnost vidimo v odvisnosti višine signala oz. integrirane ploščine pod grafom od napetosti nad pragom.

Zadnji del signala predstavlja mrtvi čas, ko se elektronski plaz sprošča preko upora – tem času detektor ne more zaznati novih fotonov. Dolžina tega repa je povezana z velikostjo plazju, ki je odvisen od velikosti mikrocelice (večja celica pomeni daljši rep).

### 3.2.2 Sevalne poškodbe silicijevih fotopomnoževalk

Okolja z visoko sevalno obremenitvijo za uporabo silicijevih fotopomnoževalk predstavljajo oviro, saj lahko sevanje na detektorju povzroči hude posledice. Prisotne so različne vrste sevanja, na primer gama sevanje in sevanje delcev (nevtronov, protonov itd.), ki v silicijevih detektorjih povzročijo spremembe v strukturi kristala. Te poškodbe spremenijo fizikalne lastnosti detektorja, zato jih je smiselno raziskovati. Sevanje lahko v silicijevih detektorjih povzroči dve vrsti poškodb: poškodbe v kristalni strukturi zaradi neionizirajočega sevanja in poškodbe na površini zaradi ionizirajočega sevanja. Prvo povzročijo visokoenergijski delci, ki atome silicija izpodrinejo iz njihovega mesta v kristalni strukturi, kar ustvarja kristalne napake. Premaknjeni atom se premakne na novo mesto in na prejšnji poziciji pusti prsto mesto. Če je energija vpadnega delca dovolj visoka, lahko izbiti atom izpodrine druge atome okoli sebe, kar vodi do nastanka gručnih okvar (ang. cluster defect). Povzročena škoda je premo sorazmerna z oddano energijo vpadnega delca. Napake v mreži predstavljajo nove energijske nivoje med prevodnim in valenčnim pasom.



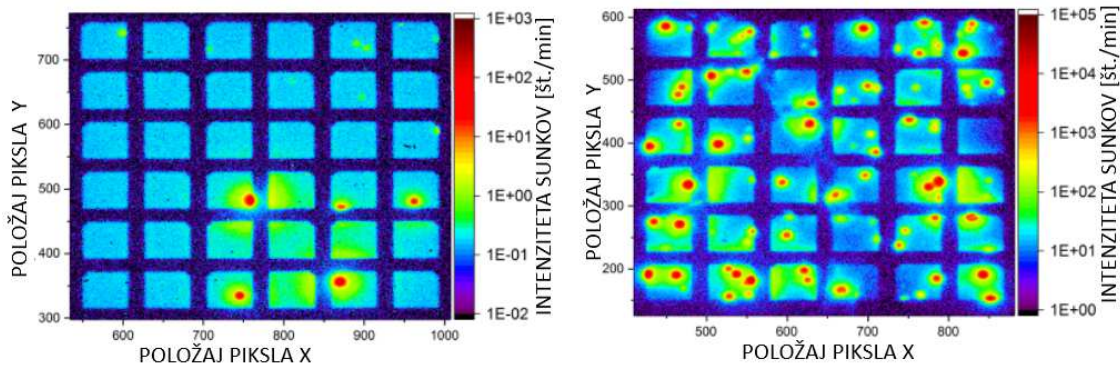


Slika 3.13: Časovna ločljivost nekaterih SiPM (velikosti  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ , velikosti mikrocelic so označene na grafu) proizvajalca Hamamatsu v odvisnosti od napetosti nad pragom. Tu je časovna ločljivost podana kot širina porazdelitve  $\sigma$ , v nadaljevanju pa bo podana kot FWHM. Povzeto po [17].

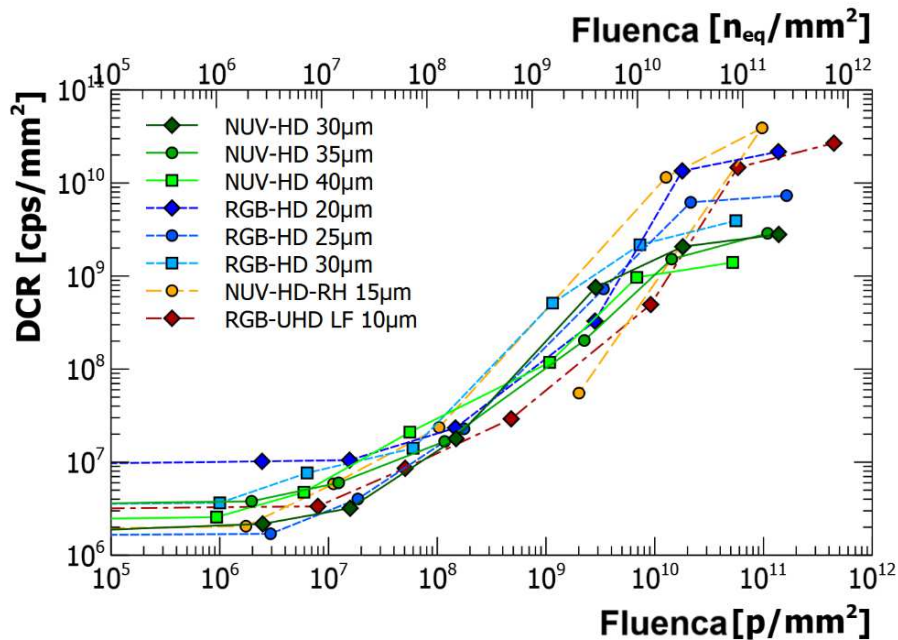
Poškodbe na površini pa povzročajo predvsem fotoni in nabiti delci, ki generirajo naboje na površini detektorja. Ti delci namreč nimajo dovolj visoke energije (cca 300 keV), da bi prodrli globlje v kristal in povzročili nastanek napak v kristalu. Vpadni fotoni pri absorpciji na površini materiala tvorijo pare elektron-luknja. Nekateri od teh parov se lahko rekombinirajo nazaj, drugi pa ostanejo prosti nosilci naboja, ki se premikajo skozi kristal z difuzijo ali driftom, če je prisotno električno polje. Elektroni imajo večjo mobilnost in običajno kristal zapustijo, luknje pa lahko ostanejo ujete v kristalu, kar kasneje lahko povzroči težave, npr. zakasnen signal. Škoda zaradi ioniziranega sevanja je manjša kot škoda zaradi neioniziranega, ker slednje povzroči škodo globlje v kristalu [3].

Največja sprememba v lastnostih obsevanih silicijevih fotopomnoževalk je pogostost sprožitve temnih sunkov (glej sliko 3.14). Zaradi vseh pri obsevanju nastalih napak je prisotnih veliko prostih nosilcev naboja, zato se oblikujejo novi energijski nivoji. Tako prej pride do termodinamičnih fluktuacij, ki so zaznavne kot neželen šum. Koliko se bo pogostost temnih sunkov povečala, je odvisno od proizvajalca in modela SiPM, njegove odpornosti na sevanje ter količine sevanja, s katero detektor obsevamo (glej sliko 3.15). Poškodbe v kristalni mreži povzročijo zmanjšanje ojačanja, zato se merjeni signal zniža, prav tako pa se lahko spremeni tudi njegova oblika. Pri tem se DCR lahko poveča do te mere, da silicijeva fotopomnoževalka izgubi sposobnost zaznavanja posameznih fotonov. Višja kot je sevalna doza, ki jo detektor prejme, bolj izrazit je temni tok [3, 18].

Napake v kristalni strukturi so pri temperaturah nad 150 K mobilne. Premaknjeni atomi se lahko izničijo sami s prostimi mesti na pravih položajih kristalne strukture, s čimer nepravilnosti popravijo, lahko pa se skozi površino difundirajo



Slika 3.14: Razlika v pogostosti temnih sunkov pred obsevanju z nevtroni (levo) in po njem (desno). Na sliki je vidno, kako pogostost temnih sunkov naraste po obsevanju in kako se lokalno pojavijo nova območja s povečanim DCR. Povzeto po [3].



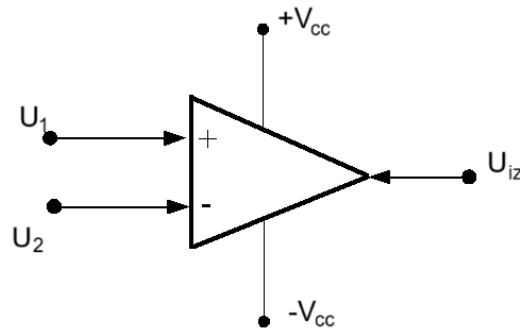
Slika 3.15: DCR v odvisnosti od količine sevanja, ki jo je detektor prejel. Količina, ki opisuje prejeto dozo sevanja, imenujemo fluenca. Na spodnji osi je fluenca sevanja s protoni, na zgornji osi pa je preračunana fluenca na nevtrone z energijo 1 MeV. Povzeto po [18]

ven. Ta proces celjenja kristalne strukture polprevodnika zaradi toplotnega gibanja delcev imenujemo žarjenje (ang. annealing) in je močno odvisno od temperature. Silikonske detektorje se lahko po obsevanju za določen čas, npr. en mesec, pusti na sobni temperaturi ali pa se jih segreje na npr. 80 °C, da proces žarjenja pospešimo. Če se želimo žarjenju izogniti, je treba detektorje hraniti na nizkih temperaturah, s čimer se proces celjenja zminimizira. Za boljše delovanje obsevanih SiPM se (poleg žarjenja) znižanje temperature zdi najboljša rešitev, saj tako vpliv termodinamičnih nihanj minimiziramo, s tem pa je zmanjšana tudi pogostost temnih sunkov. Pri detektorjih z manjšimi mikrocelicami je tudi sprememba pogostosti temnih sun-

kov manjša, saj je v manjšem volumnu po obsevanju prisotnih manj napak. Prav zato je tudi manjša debelina detektorja (in posledično izpraznjenega območja) za zmanjšanje posledic sevanja pomembna [3].

### 3.3 Ojačevalniki

Signal posameznega fotona, dobljen iz sprožene celice silicijeve fotopomnoževalke, je za učinkovito merjenje premajhen oz. ne izstopa iz elektronskega šuma, zato je treba izhodni signal iz detektorja pomnožiti. Za to uporabimo operacijski ojačevalnik (glej sliko 3.16), ki je elektronski element, s katerim lahko (ob kombinaciji z drugimi elektronskimi elementi) izvajamo različne računske operacije, npr. seštevanje, množenje, diferenciranje, integriranje ...



Slika 3.16: Skica osnovnega operacijskega ojačevalnika. Na vhoda  $+/-V_{cc}$  je priključeno napajanje ojačevalnika,  $U_1$  in  $U_2$  predstavljata vhodna signala,  $U_{iz}$  pa izhodnega.

Za zgoraj omenjene računske operacije potrebujemo specifične postavitve drugih elektronskih komponent, ki jih v tem magistrskem delu ne bomo obravnavali. Osnovna naloga ojačevalnika je pomnožiti razliko vhodnih signalov:

$$U_{iz} = (U_1 - U_2) \cdot A(f), \quad (3.3)$$

kjer  $A(f)$  predstavlja faktor ojačenja, ki se s frekvenco  $f$  spreminja. Idealni ojačevalnik bi imel konstantno ojačanje za vse frekvence, realni ojačevalnik pa je sposoben pomnožitve signala znotraj določenega območja frekvenc, ki ga imenujemo pasovna širina (ang. bandwidth). Ojačevalnik izven tega območja prejetega signala ne ojača s polno, ampak z zmanjšano močjo; primer prikazuje graf 3.17.

Ojačanje  $A$  je razmerje med izhodnim in vhodnim signalom; lahko gre za razmerje amplitude  $\frac{U}{U_0}$  ali pa moči  $\frac{P}{P_0}$ . Ojačanje pogosto izrazimo v enoti decibel (dB), ki se za moč izračuna:

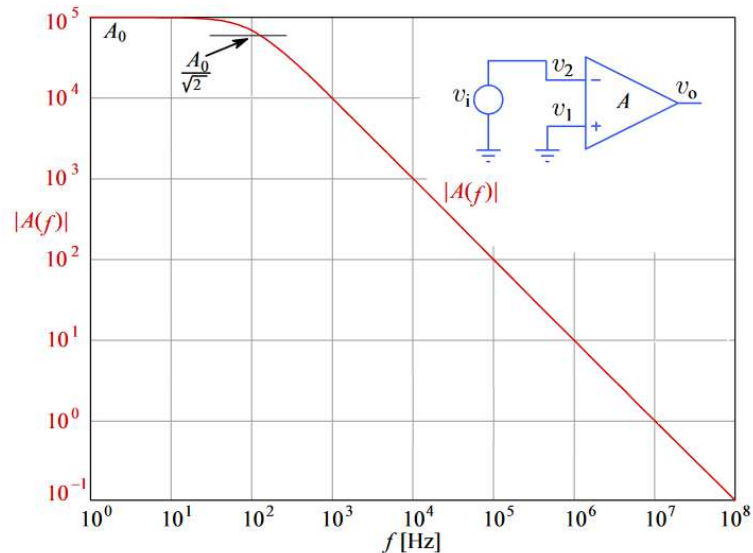
$$A_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right), \quad (3.4)$$

pri amplitudi pa je zaradi relacije  $P \propto U^2$  namesto faktorja 10 faktor 20:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U}{U_0} \right). \quad (3.5)$$

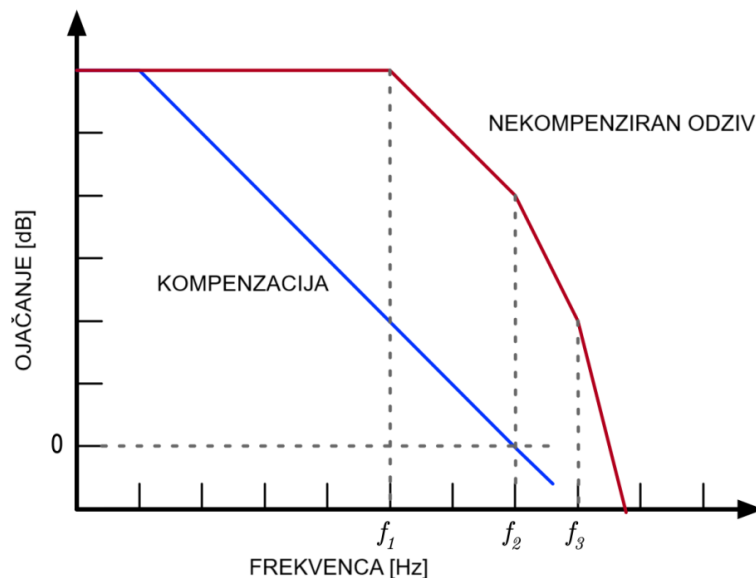
Za ojačevalnik je pomembno, pri kateri frekvenci se moč ojačanja zmanjša na polovico. To označuje mejo pasovne širine ojačevalnika, ki je pri  $-3\text{dB}$ , če gledamo moč ojačanja, oziroma pri  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  za amplitudo.

Ojačevalniki, uporabljeni v našem eksperimentu, so visokofrekvenčni, zato njihov odziv – pasovno širino – merimo na skali MHz. Večja pasovna širina omogoča



Slika 3.17: Primer frekvenčnega odziva ojačanja  $A$  (rdeče) ojačevalnika na sliki desno zgoraj. Točka  $\frac{A_0}{\sqrt{2}}$  označuje, kje se moč ojačevalnika zmanjša na polovico. Povzeto po [19].

ojačanje frekvenc v večjem intervalu. Odziv ojačevalnika lahko tudi popravljamo, in sicer s kompenzatorjem. Če želimo frekvenčni odziv izboljšati, lahko ojačevalniku dodamo komponente, katerih frekvenčni odziv popravi nepravilnosti v odzivu ojačevalnika (glej sliko 3.18). V našem primeru smo želeli s kompenzatorjem razširiti pasovno širino ojačevalnika, kar je opisano v poglavju 5.2.1.

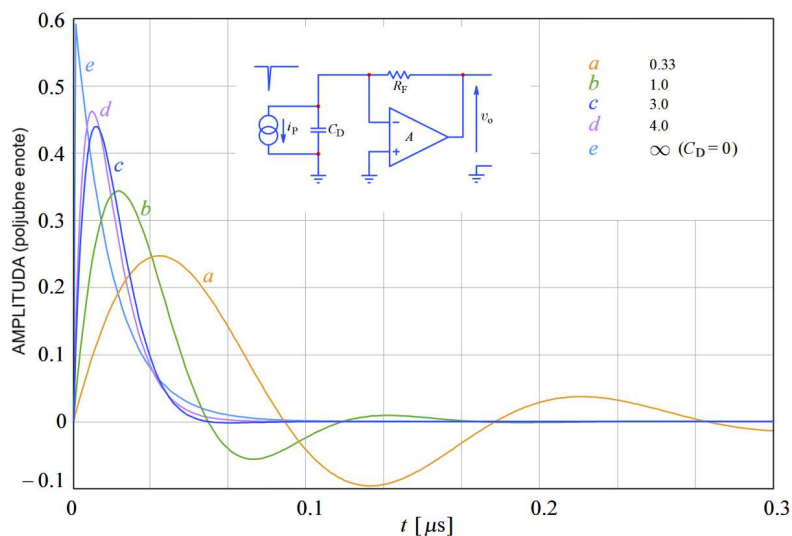


Slika 3.18: Primer frekvenčnega odziva ojačevalnika pred in po kompenzaciji. Na sliki je z rdečo prikazan prvotni odziv ojačevalnika, ki ima pri frekvencah  $f_{1-3}$  spremenjeno ojačanje. Če se temu želimo izogniti, sestavo ojačevalnika kompenziramo in tako dobimo enakomeren odziv, prikazan z modro. Frekvence na grafu so prikazane na logaritemski skali. Povzeto po [20].

Oblika signala silicijeve fotopomnoževalke je posledica hitrega nastanka elektron-

### Poglavje 3. Zaznavanje fotonov

skega plazu. Časovni odziv ojačevalnika na takšno obliko signala lahko primerjamo z odzivom ojačevalnika na signal Diracove delta funkcije (glej sliko 3.19).



Slika 3.19: Primer časovnega odziva ojačevalnika (na sredini zgoraj) na delta funkcijo. Različne oblike so posledica izbire različnih karakterističnih konstant ojačevalnika, kjer vrednost  $e$  predstavlja odziv idealnega ojačanja. Realne vrednosti pa prikažejo, da je naraščanje signala strmo (in povezano z ojačanjem), po naraščajočem delu pa sledi proces iznihanja nazaj v ravnovesno lego. Ta rep pogosto opazujemo tudi pri silicijevih fotopomnoževalkah. Povzeto po [19].

# 4. Opis merilnega sistema

## 4.1 Izhodišča in hipoteze

Za opazovanje fizikalnih lastnosti detektorjev potrebujemo merilni sistem, s katerim bomo lahko primerjali karakteristike silicijevih fotopomnoževalk pred obsevanjem z nevtroni in po njem. Temeljni namen mojega magistrskega dela je preučiti vpliv merilne elektronike na merjenje signalov različnih SiPM in določiti njihove časovne ločljivosti.

V okviru izhodiščne hipoteze smo predvidevali, da bi izboljšanje več dejavnikov meritve prispevalo k večji zanesljivosti določanja časovne ločljivosti (po izkušnjah iz drugih eksperimentov smo sklepali, da bi ta morala znašati okoli 100 ps). Zato smo izvedli več meritev, pri katerih smo bili pozorni tako na tip SiPM in potencialno uporabo kompenzatorja kot tudi na izbiro ustrezne metode za določanje časovne točke – širše pa na vse, za kar bi se med izvajanjem eksperimenta izkazalo, da bi lahko na določanje časovne ločljivosti tako ali drugače vplivalo (znan dejavnik vpliva je tudi temperatura merilnega sistema, vendar smo se zaradi osredotočenosti na druge dejavnike odločili, da jo bomo pri tem eksperimentu zanemarili). Na koncu smo se osredotočili zlasti na meritve, priprava in rezultati katerih so predstavljeni v nadaljevanju.

## 4.2 Priprava eksperimenta

Delo je potekalo na Institutu Jožef Stefan, na Odseku za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev v okviru raziskave o odpornosti silicijevih fotopomnoževalk na sevanje.<sup>1</sup>

Pri pripravi za izvedbo eksperimenta smo želeli vzpostaviti merilno okolje, ki omogoča enostaven dostop do merjenega SiPM, čim boljšo berljivost opazovanega signala, obenem pa njegovo ločenost od pričakovanega elektronskega šuma. Za zajem podatkov smo uporabljali program, napisan v LabWindows CVI [21], za analizo pa programsko orodje ROOT [22].

Na začetku meritev smo imeli na razpolago 4 SiPM proizvajalca KETEK različnih velikosti, v nadaljevanju pa smo se osredotočili na SiPM proizvajalca FBK (glej tabelo 4.1 in sliko 4.1). Oznake SiPM sledijo vzorcu "PMXXYY", kjer PM pomeni PhotoMultiplier (ang. za fotopomnoževalko), XX predstavlja njeno velikost, YY pa velikost SPAD. SiPM velikosti  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  imajo pragovno napetost 30 V, PM1125 25 V in PM1115 32 V. Ker lahko s preveliko napetostjo silicijevo fotopomnoževalko uničimo (steče velik tok, ki lahko trajno poškoduje plasti v SiPM), smo se odločili, da v eksperimentu napetost nad pragom omejimo na 7 V za vse SiPM, razen za PM1125, kjer smo se omejili na 6 V.

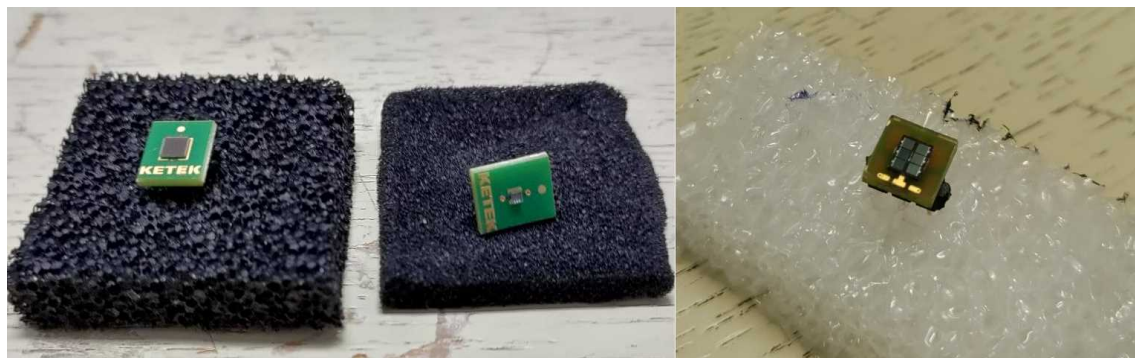
---

<sup>1</sup>ARIS projekt: <https://apps.izum.si/ecris/si/sl/project/20748>

## Poglavje 4. Opis merilnega sistema

Tabela 4.1: V eksperimentu uporabljene silicijeve fotopomnoževalke in njihove osnovne lastnosti.

Oznaka	proizvajalec	velikost [mm <sup>2</sup> ]	velikost mikrocelice [μm]	prag. napetost [V]	PDE pri 5 V <sub>ov</sub> [%]
PM1115	FBK	1 × 1	15	32	< 30
PM1125	KETEK	1 × 1	25	25	45
PM3315	KETEK	3 × 3	15	30	29
PM3335	KETEK	3 × 3	35	30	41
PM3347	KETEK	3 × 3	47	30	47



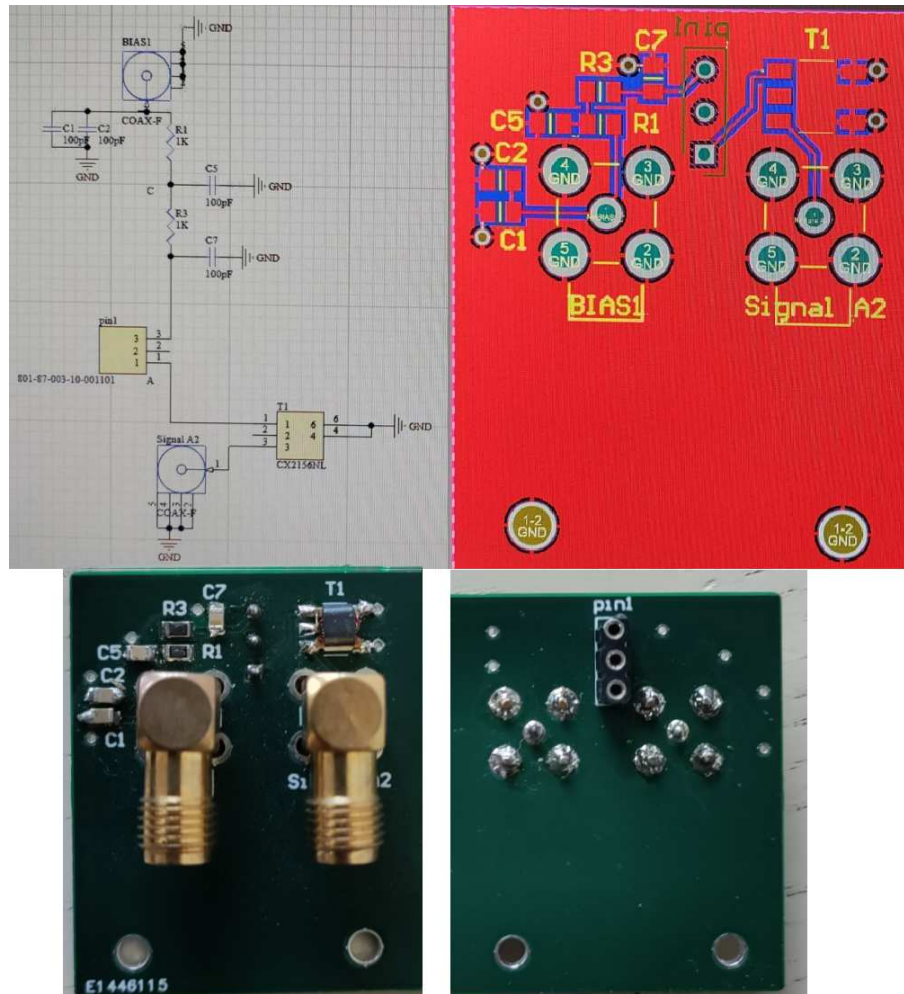
Slika 4.1: V eksperimentu uporabljene silicijeve fotopomnoževalke. Levo je PM3335, na sredini PM1125 (obe proizvajalca KETEK) in desno PM1115 (proizvajalec FBK). Pri slednji je na sliki vidnih 6 enakih fotopomnoževalk, vendar je bila samo ena povezana s kontakti na zadnji strani in tako priključena na napetost.

Preiskovano silicijevo fotopomnoževalko smo pritrdili na nosilno ploščico (glej sliko 4.2), zaprli v temen prostor in nanjo svetili z laserjem. Za napajanje SiPM v zaporni smeri smo uporabili napajalnik Multicomp pro MP710081, za njegovo osvetljevanje pa laser Advanced Photonic Systems EIG1000D PiLas z valovno dolžino 635 nm. Da bi pridobili čim bolj merljiv signal, smo med eksperimentom nosilno ploščico večkrat prilagodili ter preizkušali različne postavitve in vrednosti uporov in kondenzatorjev.

Količino svetlobe iz laserja smo zmanjšali do te mere, da smo na SiPM lahko merili posamezne fotone, ki smo jih v merilni prostor pošiljali preko optičnega kabla FT030-Y. Na nosilno ploščico smo pritrdili dva 50 Ω koaksialna kabla, dohodnega za napajalno napetost za SiPM, izhodnega pa za izmerjen signal. Ker je signal posameznih fotonov iz silicijeve fotopomnoževalke relativno majhen (samo nekaj mV – premalo, da bi bile meritve signalov ločene od šuma, glej sliko 4.3), smo zraven priključili še ojačevalca signala. Njegova naloga je pomnožiti signal do te mere, da signal SiPM postane merljiv (nekaj 10 mV) in čim bolj ločen od elektronskega šuma.

Za zajemanje signalov smo uporabljali vzorčevalnik signalov DRS4 evaluation board, ki je analogni signal pretvoril v digitalnega in ga pošiljal v računalnik (slika

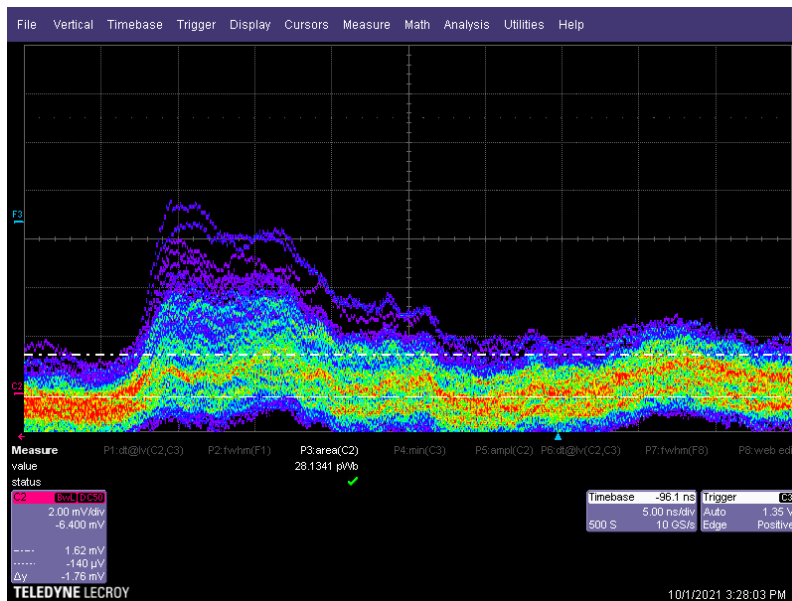




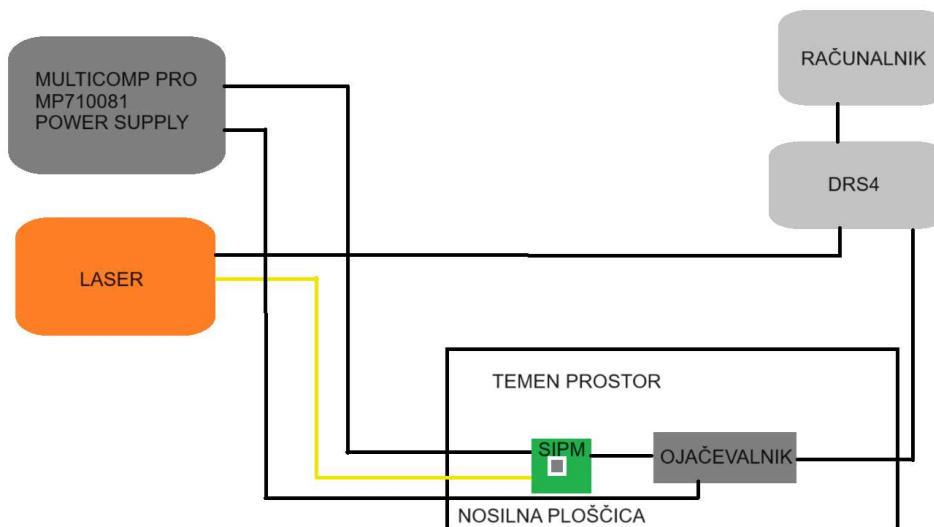
Slika 4.2: Ploščica, kamor smo pritrdili merjeno silicijevo fotopomnoževalko. Zgoraj: levo je elektronska shema, desno pa skica tiskanega vezja, prikazana v programu za tiskana vezja Altium. BIAS1 predstavlja napajalno napetost v zaporni smeri za SiPM, ki smo ga pritrdili na mesto pin1. Upori in kondenzatorji služijo stabilizaciji sistema, T1 pa je transformator pretvorbe 1 : 1 za preslikavo izhodnega signala iz SiPM na Signal A2. Spodaj: dokončana ploščica, velikost  $3,0 \times 2,8 \text{ cm}^2$ . Vrednosti komponent, ki smo jih uporabili pri končni verziji: upora  $R1 = 51 \Omega$  in  $R3 = 201 \Omega$ ; kondenzatorji  $C1 = 750 \text{ nF}$  ( $C2$  nismo uporabili),  $C5 = 130 \text{ nF}$  in  $C7 = 100 \text{ nF}$ .

4.4). Na računalniku smo zajemali posnetke signalov (ang. waveforms), jih analizirali in določali časovno ločljivost SiPM. Izhodni signal smo pred tem opazovali na osciloskopu in primerjali spremembe oblik signala pri različnih ojačevalcih. Cilj je bil dobiti čim bolj čist signal – to pomeni, da je signal posameznih fotonov viden in ločen od šuma (glej sliko 4.5).

Sprva smo temen prostor skušali zagotoviti tako, da smo nosilno ploščico s SiPM samo zavili v črno odejo, vendar je elektromagnetno polje okolice na meritev močno vplivalo in slabšalo njeno kakovost. Zato smo skušali čim več elektronike zapreti v Faradayevo kletko, da bi eksperiment ostal kar najbolj izoliran od zunanjih elektromagnetnih polj, s čimer bi se količina elektronskega šuma zmanjšala. Da bi to dosegli, smo nosilno ploščico skupaj z optičnim kablom zaprli v kovinsko škatlo iz aluminija. V nadaljevanju smo v to škatlo zaprli tudi ojačevalec in s tem vplive ele-



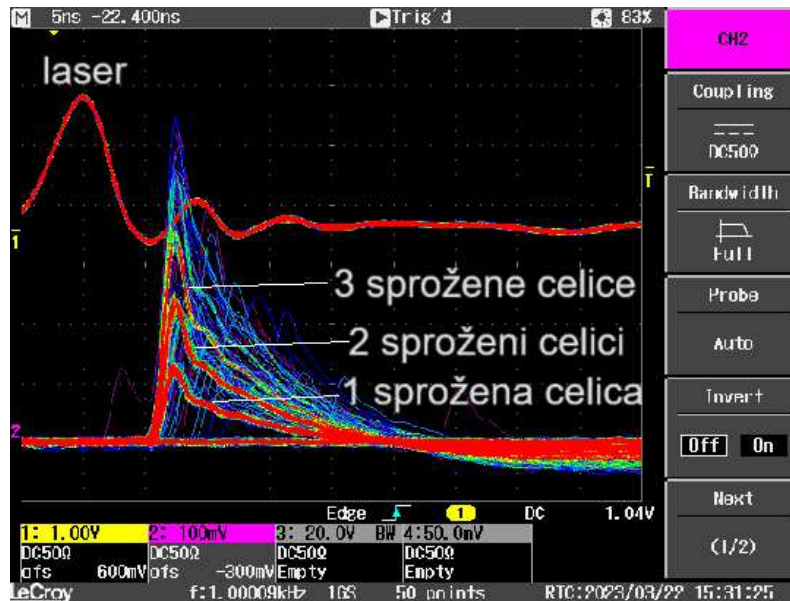
Slika 4.3: Primer neojačanega signala iz silicijeve fotopomnoževalke. Zadetki posameznih fotonov niso vidni in so slabo ločeni od elektronskega šuma.



Slika 4.4: Skica merilnega sistema. Za napajanje ojačevalca smo uporabili isti napajalnik kot za napajanje SiPM.

ktromagnetnih polj na ojačitev signala omejili, da je bil signal kolikor je le mogoče čist in gladke oblike.

Kljub temu, da so SiPM dokaj odvisni od temperature (njihove lastnosti se z njenim nižanjem spremenijo), merilno okolje temperaturno ni bilo izolirano, ker to (kot že omenjeno zgoraj) ni bil eden od ciljev raziskave – vseeno pa lahko trdimo, da rezultati veljajo za detektorje pri sobnih temperaturah oz. malce nad njimi. Merilni prostor se lahko zaradi obratovanja pod električnim tokom lokalno segreje.



Slika 4.5: Primer dobro berljivega signala posameznih fotonov, prikazanega na osciloskopu. Signal je praktično brez elektronskega šuma, vsaka sprožena celica pa je ekvivalent fotonskemu dogodku: 1 celica pomeni, da smo zaznali 1 foton, 2 celici predstavljata 2 fotona itd.

### 4.2.1 Ojačanje in zajemanje signala

Eksperiment smo začeli s primerjavo različnih ojačevalcev in opazovali, kateri izmed njih omogoča, da so signali posameznih fotonov najbolj jasno vidni. Na voljo nam je bilo 6 ojačevalcev, ki so navedeni v tabeli 4.2. Vsakega smo priključili na analizator Vector Network Analyzer PicoVNA ter izmerili njegovo ojačanje in pasovno širino – tj. frekvenčni interval, v katerem ojačevalec signal pomnoži za navedeno ojačanje. Izmerjene vrednosti smo primerjali z vrednostmi, ki jo je navedel proizvajalec.

Analizator Vector Network Analyzer PicoVNA v ojačevalec pošlje harmonski signal in zajame ojačan signal iz ojačevalca. Nato razmerje med vhodnim in izhodnim signalom prikaže kot ojačanje v odvisnosti od frekvence na območju od 3 do 5.000 MHz. Da smo določili moč ojačanja ojačevalca, smo vhodni signal v ojačevalec zmanjšali z dušilnikom Aduora AD-USB4AR36G95. Za rezultat (razmerje med vhodnim in izhodnim signalom) smo dobili frekvenčni odziv, kjer je bilo 0 dB maksimalno ojačanje. To pomeni, da je dušenje vhodnega signala enako pomnožitvi izhodnega signala. Pasovno širino ojačevalca smo določili kot območje frekvenc, kjer je bilo ojačanje večje od  $-3$  dB. Graf pasovnih širin je prikazan v poglavju 5.2.1.

Frekvenčni odziv ojačevalca je mogoče spreminjati s kompenzatorjem. Z vzporedno vezavo upornika in kondenzatorja za ojačevalcem smo želeli razširiti pasovno širino. To vezavo smo pri nekaterih meritvah vstavili na konec verige instrumentov (za ojačevalcem in pred DRS4), da bi preizkusili, ali bodo končni rezultati kaj boljši (glej sliko 4.7). Vrednosti komponent kompenzatorja smo spreminjali ter opazovali spremembe v obliki signala in morebitno izboljšanje časovne ločljivosti.

DRS4 evaluation board [23] je štirikanalni vzorčevalnik signala, ki vsebuje čip Domino Ring Sampler in je namenjen pretvorbi analognega signala v digitalni zapis. Z 1024 celicami za vzorčenje shranjuje izmerjene napetosti za dva signala: sprožilni signal z laserja (ang. trigger) in izmerjeni signal iz silicijeve fotopomnoževalke (glej

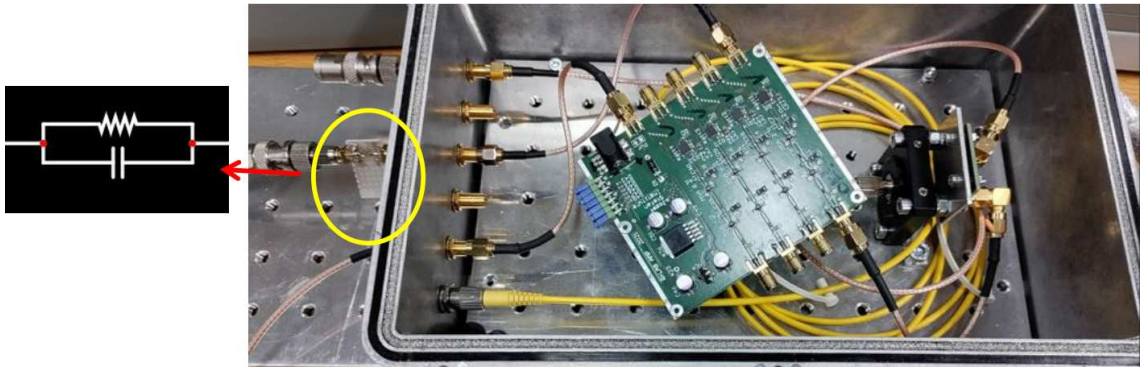


Slika 4.6: Prikaz meritve z analizatorjem. Z dušilnikom smo vhodni signal zmanjšali do te mere, da je bilo maksimalno ojačanje 0 dB. S tem je bilo ojačanje ojačevalca enako dušenju dušilnika.

Tabela 4.2: V eksperimentu uporabljeni ojačevalci. Njihove oznake smo določili na začetku eksperimenta in so popolnoma arbitrarne. Slike ojačevalcev so prikazane v poglavju 5.2.1. Navedena pasovna širina in ojačanje sta podatek proizvajalca, izmerjena ojačanja in pasovne širine smo določili s pomočjo analizatorja Vector Network Analyzer PicoVNA.

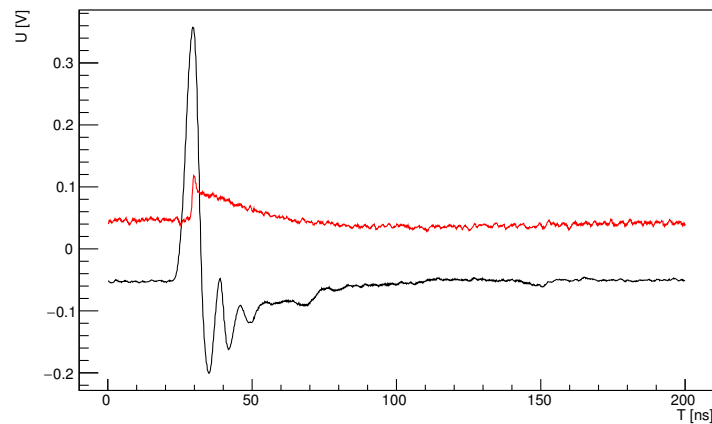
Oznaka	navedeno ojačanje [dB]	izmerjeno ojačanje [dB]	napajalna napetost [V]	navedena pasovna širina [MHz]	izmerjena pasovna širina [MHz]
amp3rd	30	27	6,3	0–800	20–220
amp4ch	40	42	12	0–800	3–400
ampCN	40	42	9	1–3.000	30–690
new40db	40	40	5	30–4.000	3–950
new30db	30	14	7	0,1–2.000	240–1.250
KETEK	30	24	12	0,1–1.000	3–2.350

sliko 4.8). Pred meritvijo je potrebno opraviti interno kalibracijo čipa DRS. S tem se elektronske celice, ki so namenjene za shranjevanje analognih podatkov, prilagodijo merilnemu območju in odpravijo morebitne nepravilne vrednosti, ki bi bile v celicah že zapisane. V merilnem intervalu napetosti  $\pm 0.5$  V in v času nekaj 100 ns tako dobimo dva signala. Frekvenco vzorčenja točk je mogoče nastaviti v razponu 1–5



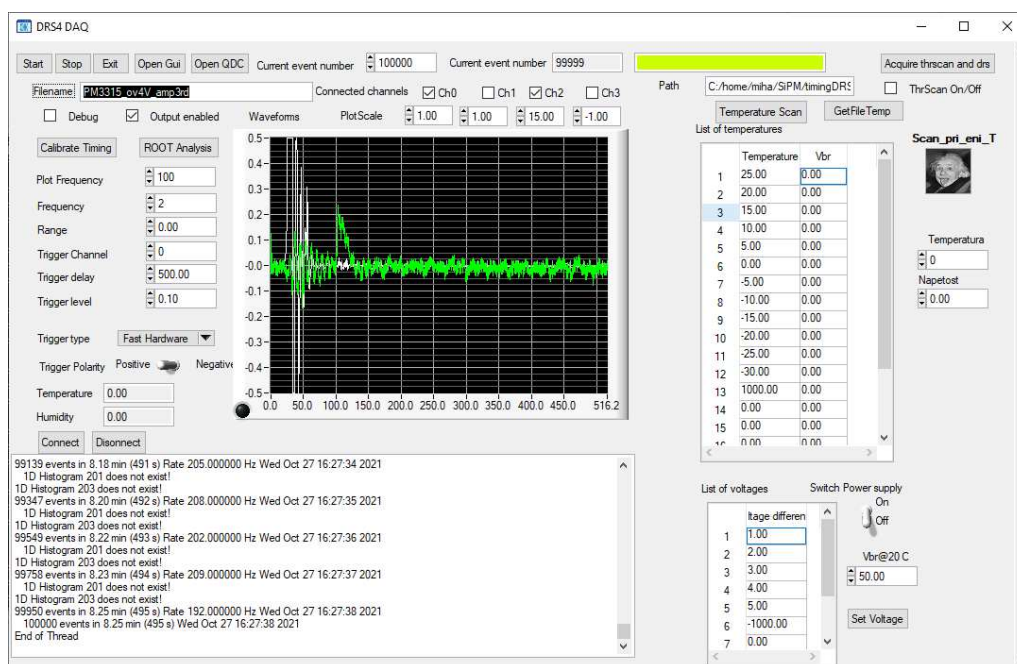
Slika 4.7: Shema in postavitev kompenzatorja v merilnem sistemu. Kompenzator smo uporabili samo na ojačevalcu amp4ch, ki se je izkazal za najboljšega.

GSpS (milijarda vzorcev na sekundo, ang. giga samples per second), od tega pa je odvisna tudi časovna skala zajema (od  $1 \mu\text{s}$  do  $200 \text{ ns}$ ). Pri večini naših meritev smo nastavili najhitrejšo vzorčenje –  $5 \text{ GSpS}$ . Zajemali smo po nekaj deset tisoč dogodkov na posamezno meritev (po navadi  $20.000$ ), kar je za izvedbo statističnih izračunov dovolj, obenem pa ne toliko, da bi zajemanje posnetkov signalov vzelo veliko časa. Parametre smo nastavili z uporabniškim vmesnikom, prikazanim na sliki 4.9.



Slika 4.8: Primer signala iz vzorčevalnika DRS4. Rdeče je zajeti signal silicijeve fotopomnoževalke, črno pa signal laserja. Za boljšo prepoznavo sta grafa premaknjena iz osnovne lege, SiPM za  $50 \text{ mV}$  navzgor, laser pa za  $50 \text{ mV}$  navzdol.

Ker smo želeli izmeriti le dva signala, smo ju priključili na vhoda 1 in 3, da je bil med njima en kanal prost. S tem smo zmanjšali možnost električnega presluha med kanali, ki je lahko posledica delovanja elektronike znotraj DRS4. Signal iz laserja je vedno enak in ima obliko sinusnega pulza. Njegova višina ( $\sim 2 \text{ V}$ ) je za merilno območje DRS4 previsoka, zato ga najprej zmanjšamo z dušilnikom signala Adaura AD-USB4AR36G95, ojačeni signali posameznih fotonov iz SiPM pa so že dovolj veliki za meritev. Oba signala shranjujemo na isti graf, ki ga potem uporabimo za analizo.



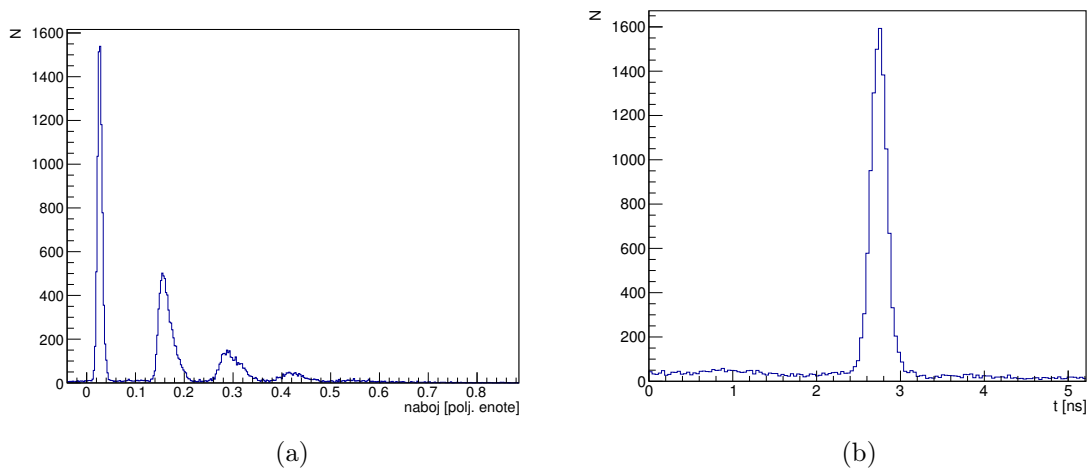
Slika 4.9: LabWindows/CVI uporabniški vmesnik za zajemanje signalov. Graf na sredini prikazuje enega izmed zajetih dogodkov, parametri a levi strani so parametri, ki jih moramo določiti za merjenje. Parameter “Frequency” smo uporabili za določanje frekvence vzorčenja GSpS, hkrati je bilo z njim določeno časovno okno zajema ( $5 \text{ GSpS} \sim 200 \text{ ns}$ ,  $1 \text{ GSpS} \sim 1.000 \text{ ns}$ ). S “Trigger delay” smo iskani signal ujeli v merilno okno, s “Trigger level” pa določili, na kateri višini sprožilnega signala zajem začnemo. Na vrhu smo s “Current event number” določili število zajetih dogodkov. Isti program smo uporabljali za meritve, ki so odvisne od temperature, čemur služijo parametri na desni strani.

### 4.3 Analiza posnetih signalov

Kot opozorjeno že v uvodu, je bila poleg oblike signala ena od temeljnih spremenljivk, ki nas je pri primerjavi zanimala, časovna ločljivost. To smo določali na podlagi statistične porazdelitve prednjega roba signala fotonov. Za določanje časovne točke, ki naznanja prihod fotona v detektor, lahko uporabimo dve tehniki: metodo diskriminacije pri konstantnem deležu višine (ang. constant fraction) ali pa metodo diskriminacije pri konstantni višini (ang. leading edge). Pri slednji izberemo neko poljubno višino, ki je nad elektronskim šumom signala, a še vedno pod višino signala enega fotona. S tem zagotovimo, da sproženi signali zares izvirajo iz zaznanih fotonov – naredimo diskriminacijo. Pri prehodu signala SiPM čez omenjeno višino to časovno točko označimo kot prihod fotona. Za analizo podatkov v našem eksperimentu smo sicer izbrali diskriminacijo pri konstantnem deležu višine – tu je višina določena kot delež maksimalne višine signala. Drugače kot prejšnja metoda je ta višina nekonstantna in je odvisna od števila zaznanih fotonov – toda ker od najvišje točke vedno vzamemo isti delež, s tem dosežemo približno enak naklon strmine prednjega roba ne glede na višino signala, torej število zaznanih fotonov. Za nas to sicer ni tako pomembno, ker smo se v eksperimentu osredotočili na zadetke enega fotona. Ker nam je metoda diskriminacije pri konstantni višini v začetku eksperimentiranja zaradi velikega elektronskega šuma pri računanju časovne ločljivosti povzročala

težave, smo vseeno ostali pri metodi diskriminacije pri konstantnem deležu višine.

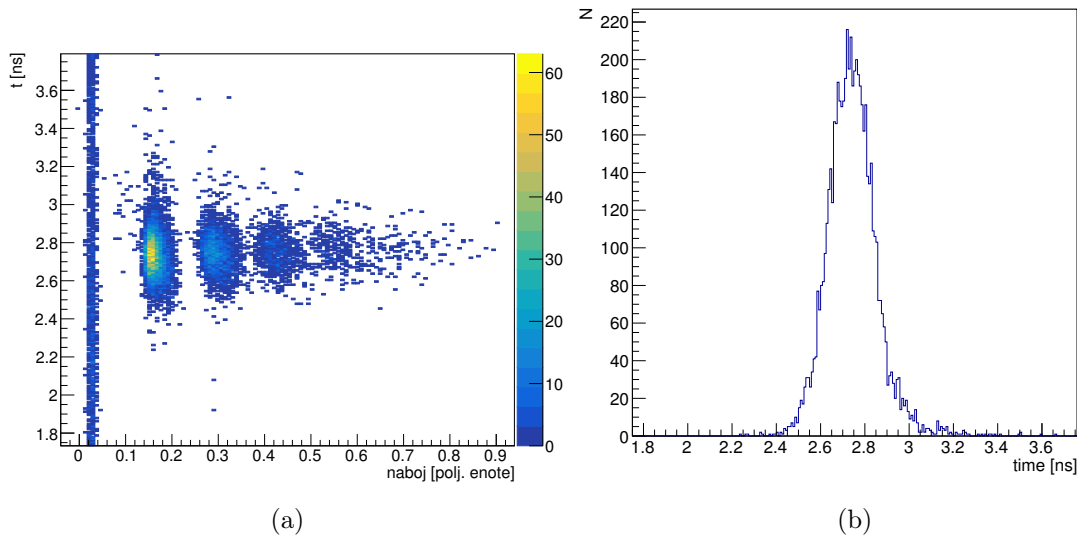
Vsakemu signalu določimo vrh, torej maksimum na območju, kjer pričakujemo dogodek. Pričakovan interval, kjer naj bi se dogodek zgodil, dobimo iz dolžin kablov, ki oba signala privedejo do vzorčevalnika. Ta korak je za signal SiPM zaradi velikega števila temnih sunkov bolj pomemben – ob odsotnosti te omejitve bi bila meritev manj zanesljiva, saj bi v merilno okno zajemali tudi signale šuma. Glede na določen vrh od omenjene višine napetosti vzamemo nekaj odstotkov in opazujemo, pri kateri časovni točki signal to višino prečka. V našem primeru je to nad 40 % maksimuma, ker naj bi bila (če upoštevamo v eksperimentu pridobljene izkušnje) pri tej višini strmina naraščajočega signala največja in je tako časovno točko mogoče določiti najbolj natančno. Tako dobimo dve časovni točki, eno za sprožilni in drugo za merjeni signal. Ta dva časa odštejemo in to časovno razliko statistično nabiramo v histogram. V idealiziranem detektorju bi za vsak zaznani dogodek dobili isto časovno razliko, tako da bi bil histogram delta funkcija. Pri realni meritvi pa so te časovne razlike porazdeljene skoraj Gaussovo, tako da širino te porazdelitve (ang. full width at half maximum – FWHM) označimo za časovno resolucijo. Zaradi različnih višin signala (če zaznamo enega ali dva oziroma več fotonov) imajo porazdelitve časovnih razlik glede na število zaznanih fotonov različne povprečne vrednosti. Osredotočili smo se na porazdelitev signalov ob zaznavi enega fotona (ang. single photon resolution), ki smo jo dosegli z računanjem ploščine pod grafom (sliki 4.10 in 4.11).



Slika 4.10: a) Primer porazdelitve signalov po izmerjeni ploščini pod grafom. Od leve proti desni nastali vrhovi pripadajo dogodkom z 0 sproženimi celicami, 1 sproženo celico, 2 sproženima celicama itd. b) Porazdelitev razlike časovnih točk med grafoma SiPM in laserja.

Rezultate za posamezne signale smo poskusili izboljšati z dodatnimi koraki v analizi.

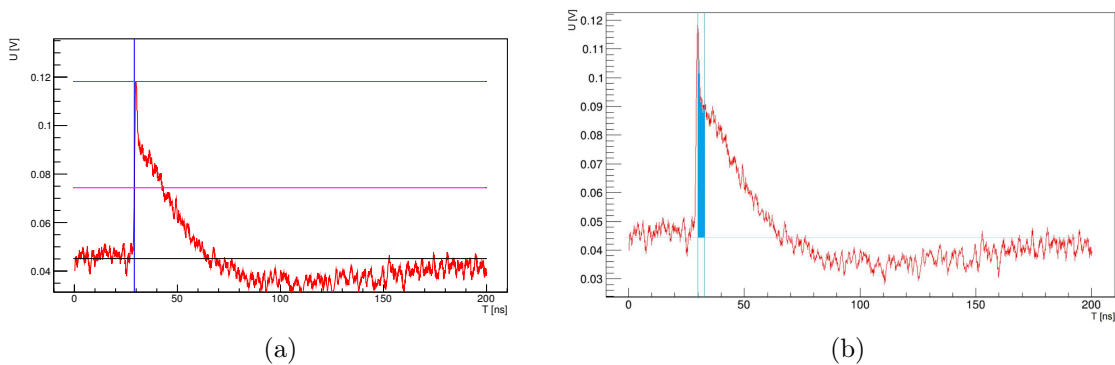
Za določanje višine signala smo najprej uporabili točko globalnega maksimuma in od njega odšteli globalni minimum. Lahko pa se je zgodilo, da se je globalni minimum pojavil drugje, kot bi pričakovali, kar je potem pokvarilo dejansko izmerjeno višino signala – to pa pomeni, da tudi časovne točke ne bi izbrali na 40 % višine, torej ne na najbolj strmem delu signala. Zato smo uvedli začetno vrednost (ang. baseline), ki smo jo dobili kot povprečje začetnih 50 točk, in to določili za minimum



Slika 4.11: a) Skupni 2D histogram porazdelitve signalov po ploščini in razlike časovnih točk (slika 4.10). b) Iz a) izberemo samo signale, ki nas zanimajo, to so zadetki enim fotonom (najvišji vrh, ki je delno označen z rumeno).

signala. Zaradi merilne tehnike DRS4 so signali pogosto rahlo nihali (cca. 10 mV), kar smo s tem korakom popravili (glej sliko 4.12 levo).

Signale, ki so jih povzročili samo posamezni fotoni, smo najprej določali z integriranjem celotnega signala oziroma širokega fiksnega merilnega območja. Izkazalo se je, da so lahko pri več signalih prisotne napake, ki meritev ploščine pod signalom otežijo. Zato smo izbrali samo ozko območje integriranja signala, ki je vključevalo vrh (glej sliko 4.12 desno).

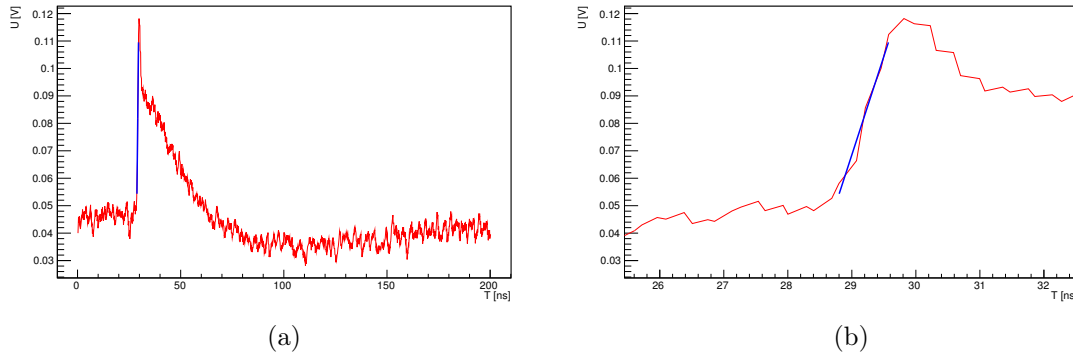


Slika 4.12: a) Časovna analiza signala SiPM: spodnja vodoravna modra črta predstavlja začetno vrednost, zgornja vodoravna zelena predstavlja maksimum signala, sredinska vijolična pa 40 % višine. Navpična zelena črta je preračunana časovna točka, ki predstavlja prihod signala fotonov. b) Omejeno območje integriranja ploščine pod grafom.

Za vsak signal smo vzeli dve časovni točki, eno nad in drugo pod mejo 40 % višine signala in med njima z linearno interpolacijo (ang. linear fit) določili, kje natančno je signal mejo prečkal. Preizkusili smo, ali bi bilo mogoče linearno regresijo izvesti

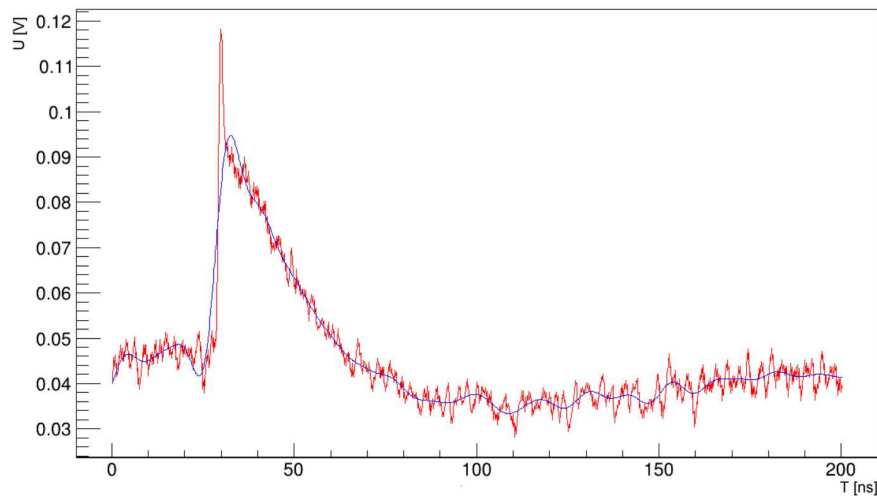


na petih zaporednih točkah v bližini iskane višine signala (glej poglavje 5.2.4) in s tem dobiti povprečje kot premico, ki bi naraščanje signala opisovalo boljše (glej sliko 4.13).



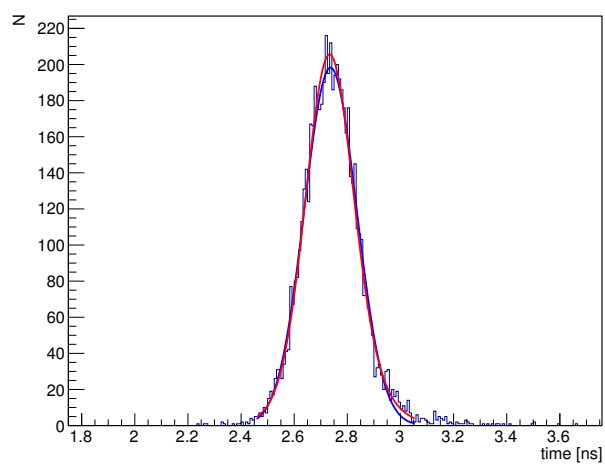
Slika 4.13: Primer linearne regresije na signalu SiPM. b) je približan pogled grafa a) v območju naraščanja signala.

Na celotnem signalu smo uporabili tudi nizkofrekvenčni filter (ang. lowpass filter) in primerjali, ali so rezultati kaj boljši (slika 4.14).



Slika 4.14: Primer uporabe nizkofrekvenčnega filtra. Modro je označen graf po uporabi 100 MHz filtra na signalu SiPM.

Zanimalo nas je tudi, kako dobro se Gaussova funkcija prilega na meritev časovnih točk signalov pri dogodkih z enim fotonom. Med eksperimentom smo ugotovili, da se dvojna Gaussova funkcija (vsota dveh Gaussovih) na meritev prilega boljše (slika 4.15). V poglavju 5.2.4 je ta trditev obrazložena pri obravnavi vpliva števila dogodkov na meritev.



Slika 4.15: Primer prileganja Gaussove (modro) in dvojne Gaussove (rdeče) funkcije na meritev. Širina enojne Gaussove funkcije:  $\text{FWHM} = 223$  ps, dvojne Gaussove funkcije:  $\text{FWHM} = 209$  ps.

# 5. Potek eksperimenta in rezultati

## 5.1 Potek

Ker je bil glavni cilj eksperimenta optimizacija sistema v kar največ njegovih elementih in dejavnikih, ki nanje vplivajo, smo med eksperimentom primerjali:

1. obliko (nanjo vpliva sam SiPM, stopnja njegove izoliranosti – to vpliva na šum) signala iz različnih ojačevalcev (ti vplivajo na berljivost signala);
2. štiri različne SiPM proizvajalca KETEK (glej Tabela 1) in še dodatno že preizkušen SiPM proizvajalca FBK;
3. učinek (vpliv na višino signala in časovno ločljivost detektorja) napetosti nad pragom.

Privzeli smo, da je za določanje časovne ločljivosti najbolj optimalna diskriminacija pri konstantnem deležu višine (CFRAC) pri vrednosti 40 % višine. Ustreznost te odločitve smo preverili tako, da smo pri eni od zadnjih meritev v analizi vrednost višine zamenjali za vrednosti v razponu od 20 do 80 %. Obenem smo na istem setu podatkov primerjali zanesljivost uporabe metode CRFAC glede na metodo diskriminacije pri konstantni višini (LED).

Med eksperimentom smo pri določanju časovne ločljivosti za iskanje časovne točke metodo dveh točk zamenjali s linearno regresijo (pri tem časovno točko iščemo tako, da skušamo skozi pet razmeroma bližnjih točk narisati premico, kar pomeni, da smo iskano časovno točko določili natančneje). Tako smo skušali preveriti, ali bo ta način kaj pripomogel k izboljšanju časovne ločljivosti.

Proti koncu eksperimenta smo preizkusili, kakšen učinek bi imelo dodano vezje v vlogi kompenzatorja. Pri tem smo na SiPM PM1115 (glej tabelo 4.2) preizkusili 6 različnih kombinacij vrednosti upornosti in kapacitivnosti. Pri preostalih smo preizkusili le 2 različni kombinaciji.

Prav tako smo proti koncu eksperimenta preverili še spremembo frekvenco vzorčenja (GSpS) DRS4, nato pa še, kakšen vpliv ima na meritev število zajetih dogodkov.

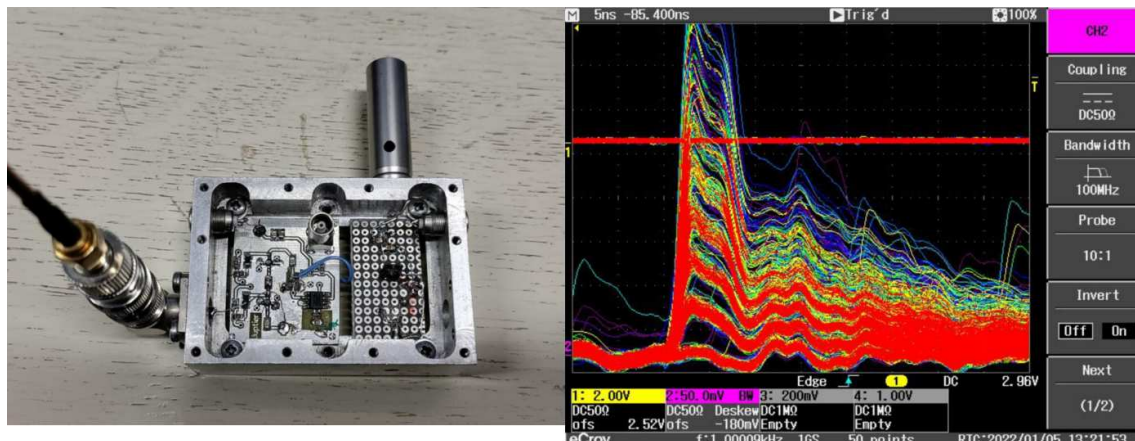
Ne v eksperimentu, temveč pozneje v analizi smo pri eni od dobljenih meritev s pomočjo programske knjižnice SciPy programskega jezika Python [24] preizkusili, ali uporaba nizkofrekvenčnega filtra meritev kakorkoli izboljša – zlasti pri časovni ločljivosti (ki nas najbolj zanima).

Po koncu eksperimenta je bila izvedena tudi meritev časovne ločljivosti laserja in DRS4. Natančnosti laserja kot merilnega elementa namreč iz celote eksperimenta ne moremo izločiti, saj njegova časovna ločljivost (ki ni idealna) vpliva na zanesljivost meritve – za rezultate, ki dejansko odražajo časovno ločljivost detektorja, je treba prispevek laserja k vrednostnim meritve odšteti.

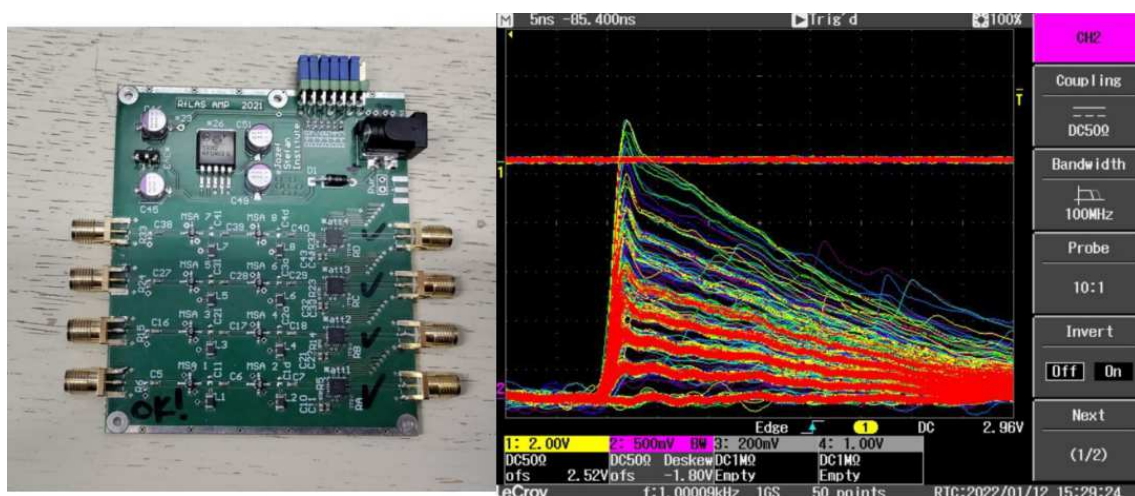
### 5.2 Rezultati

#### 5.2.1 Primerjava med ojačevalci in oblikami signalov

Na slikah v nadaljevanju so poleg ojačevalcev prikazani primeri signala posameznih fotonov, ki so nastali na izhodu ojačevalcev. Opazovani SiPM je bil PM1125 pri napetosti 29 V.

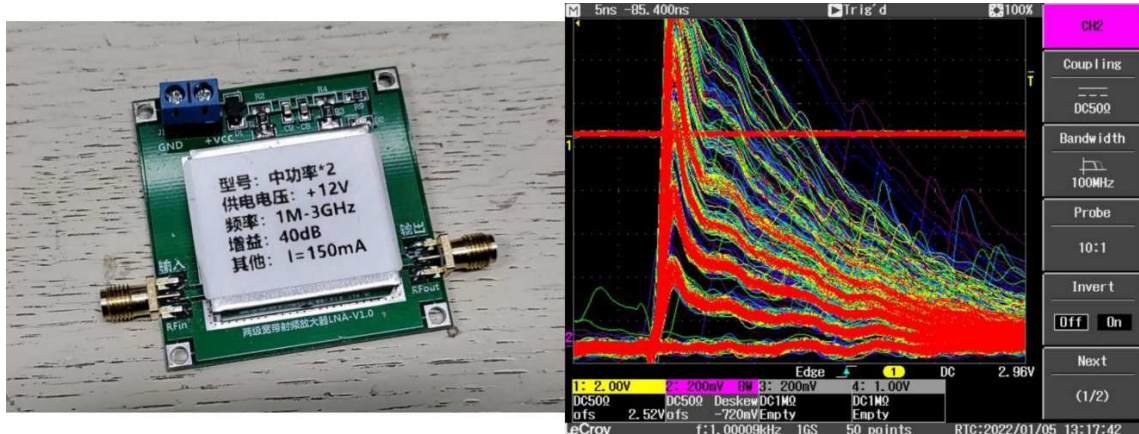


Slika 5.1: Ojačevalnik amp3rd in njegov izhodni signal. Sestavljen na IJS iz enega msa0686 ojačevalca.

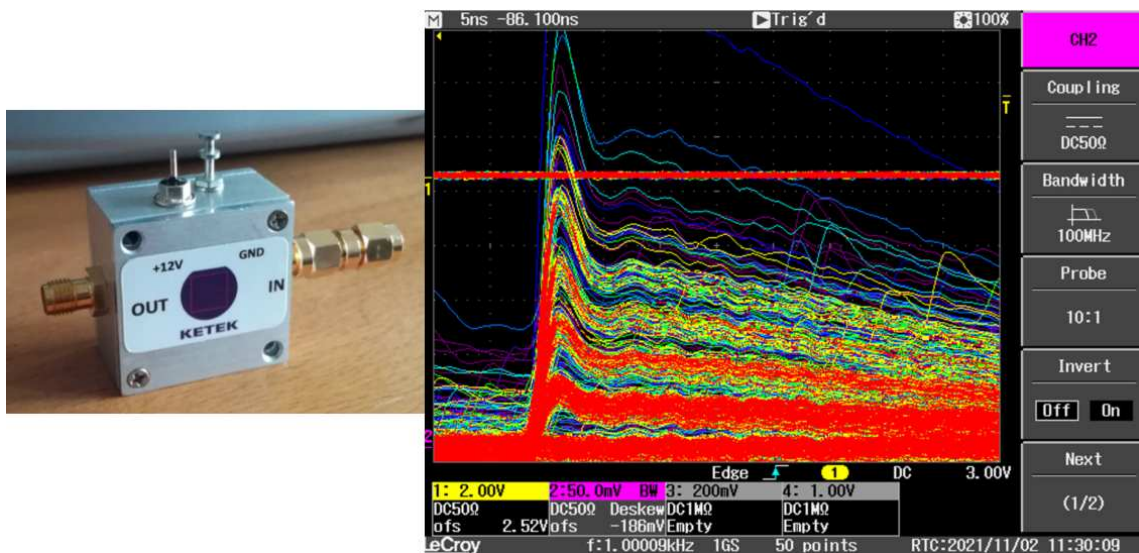


Slika 5.2: Ojačevalnik amp4ch in njegov izhodni signal. Sestavljen na IJS iz dveh zaporedno vezanih msa0686 ojačevalcev.

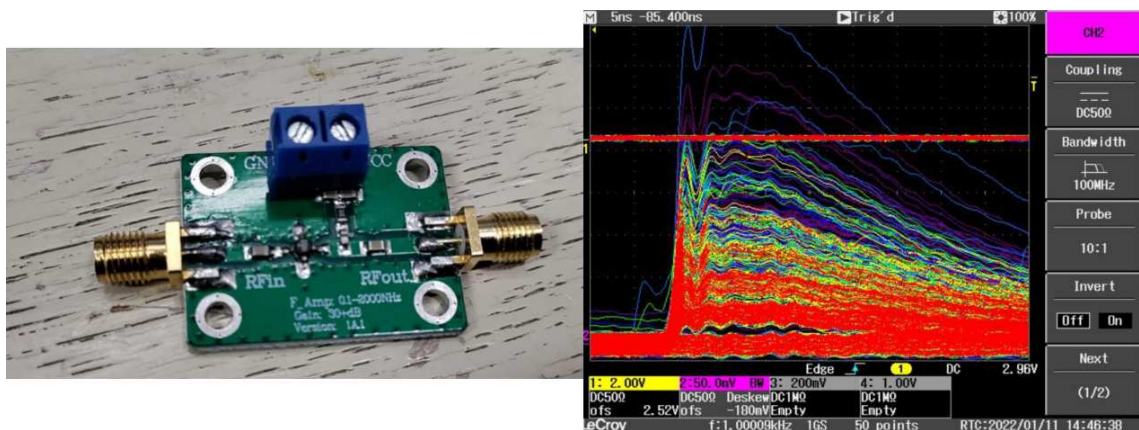
Pri ojačevalcih KETEK in new30db (sliki 5.4 in 5.5) so signali pomnoženi tako, da se posameznih fotonov ne loči najboljše in je težko oceniti, koliko celic se je sprožilo. Pri ojačevalcih amp3rd in new40db pa je na posameznih delih videti nihanje signala (sliki 5.1 in 5.6), kar je posledica slabe izolacije ojačevalca od zunanjih elektromagnetnih motenj. Za nadaljevanje eksperimenta smo tako uporabili ojačevalca ampCN in amp4ch, preostale pa smo izločili iz obravnave.



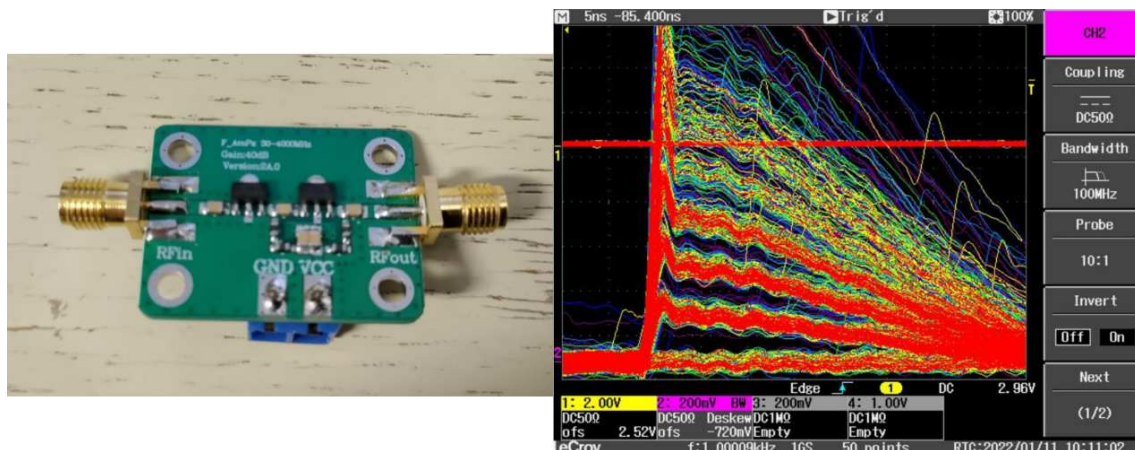
Slika 5.3: Ojačevalec ampCN in njegov izhodni signal. Naročen preko spleta.



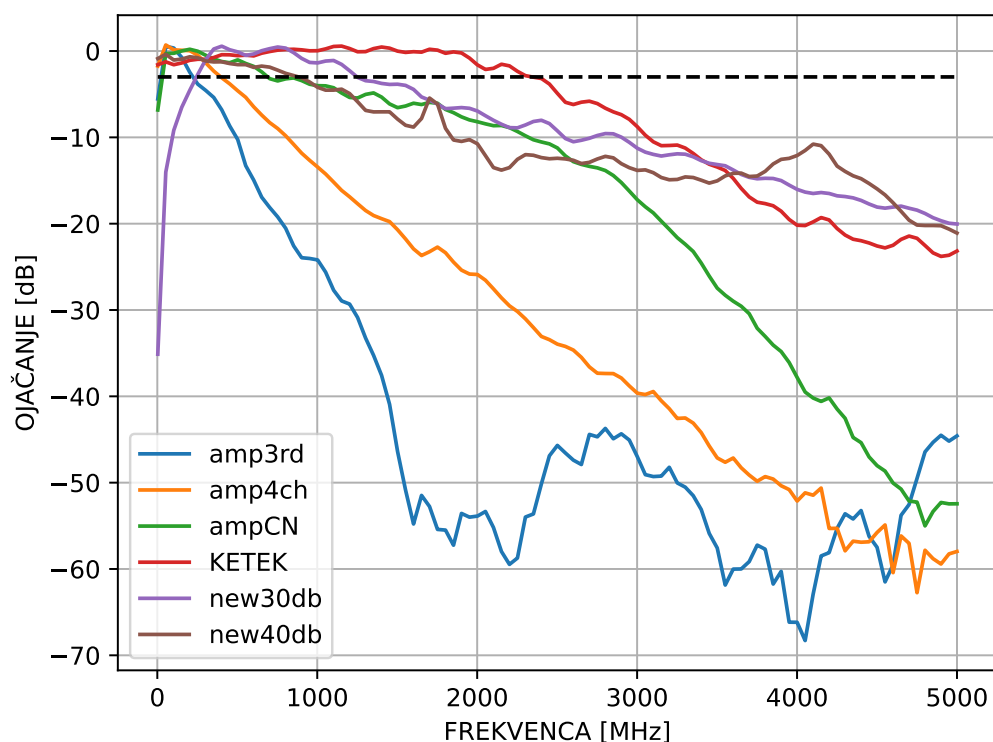
Slika 5.4: Ojačevalec KETEK in njegov izhodni signal. Naročen od proizvajalca KETEK skupaj s KETEK SiPM.



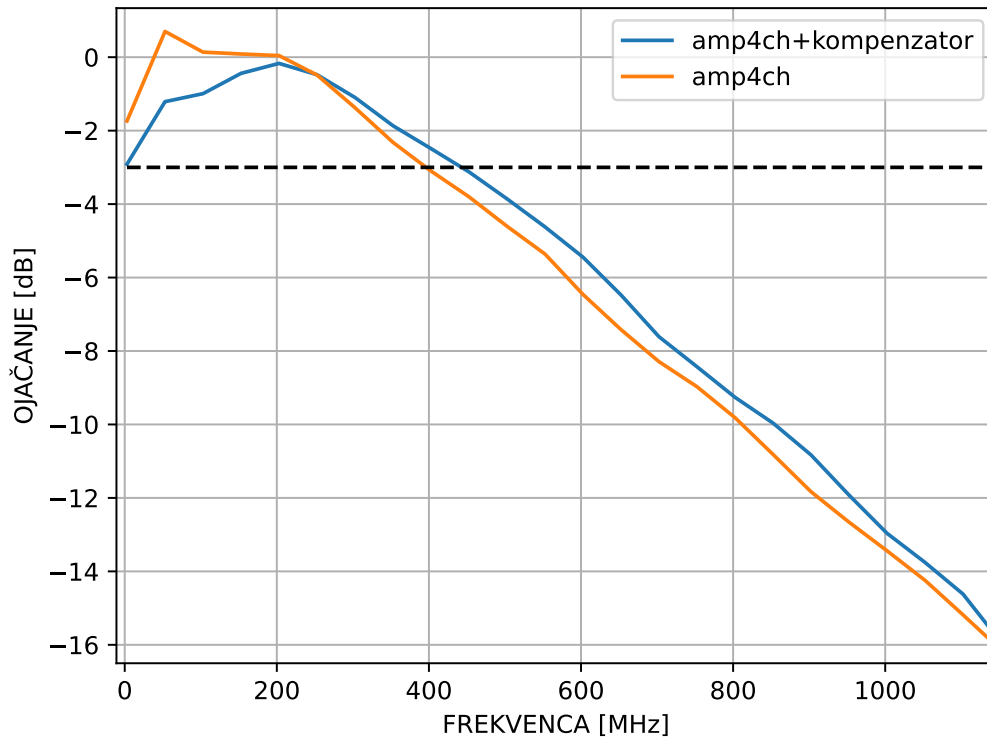
Slika 5.5: Ojačevalec new30db in njegov izhodni signal. Naročen preko spleta.



Slika 5.6: Ojačevalec new40db in njegov izhodni signal. Naročen preko spleta.



Slika 5.7: Frekvenčni odziv vseh ojačevalcev, izmerjen z analizatorjem Vector Network Analyzer PicoVN. Vsi grafi so prestavljeni tako, da je največje ojačanje na 0 dB. Črna črtkana črta predstavlja mejo ojačanja  $-3$  dB – del odziva ojačevalnika nad to črto predstavlja pasovno širino. Večina ojačevalcev je imelo slabše ojačanje od nazivnega, vsi ojačevalci razen ojačevalca KETEK pa so imeli manjše pasovne širine, kot jih je navedel proizvajalec.

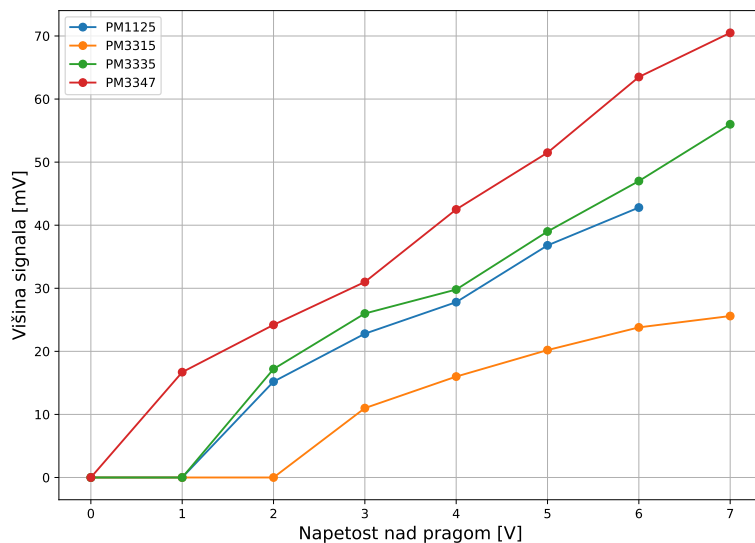


Slika 5.8: Frekvenčni odziv ojačevalca amp4ch z in brez kompenzatorja (glej sliko 4.7). Črna črtkana črta predstavlja mejo ojačanja  $-3$  dB. Pri meritvi s kompenzatorjem, za kar smo uporabili vzporedno vezavo upora in kondenzatorja (na sliki sta bili vrednosti  $R = 50 \Omega$  in  $C = 24 \text{ pF}$ ), se je ojačanje malce znižalo, pasovna širina pa se je le za malo povečala.

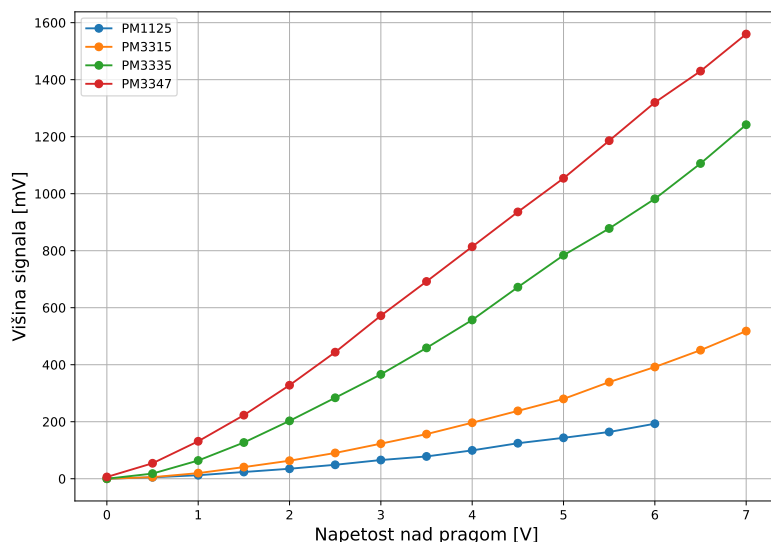
### 5.2.2 Primerjava višine signala in časovne ločljivosti

Z ojačevalcem ampCN smo izmerili višine signalov in časovne ločljivosti silicijevih pomnoževalk proizvajalca KETEK. V dodatku A so podani tudi grafi prileganja dvojne Gaussove krivulje za določanje časovne ločljivosti.

Pri vseh merjenjih je opazno, da se časovna ločljivost z višanjem napetosti nad pragom izboljšuje, vendar ne neomejeno. Z višanjem napetosti se namreč povečuje tudi količina temnih sunkov, kar meritev – s tem pa tudi ločljivost – poslabša. Pri PM3347 se to zgodi že pri  $5 \text{ V}$  nad pragom, saj je mikrocelica te fotopomnževalke največja in ima zaradi večjega volumna več temnih sunkov.

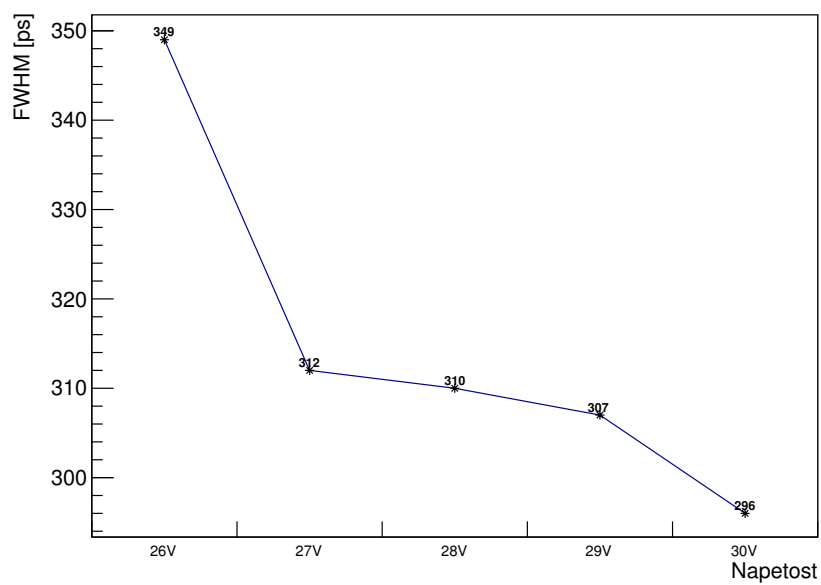


Slika 5.9: Višina signalov SiPM za posamezne fotone. Višina signala enega fotona narašča z višanjem napetosti nad pragom in je sorazmerna tudi z velikostjo mikorcelice. Pri meritvah na nižjih napetostih se je lahko naredilo, da je bil signal enega fotona neprepoznaven – ne ločen od šuma.

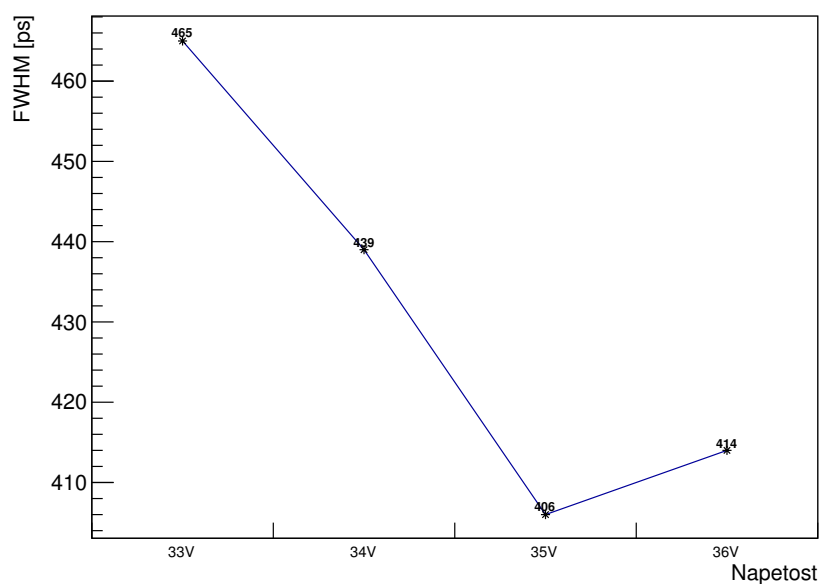


Slika 5.10: Višina signalov SiPM pri osvetlitvi z veliko svetlobe. Višina signala se tudi tukaj z višanjem napetosti povečuje, prav tako narašča z večjo mikorcelico. Vendar pa je signal PM3315 višji od signala PM1125, ker je tudi sama celica večja in ima več mikrocelic.

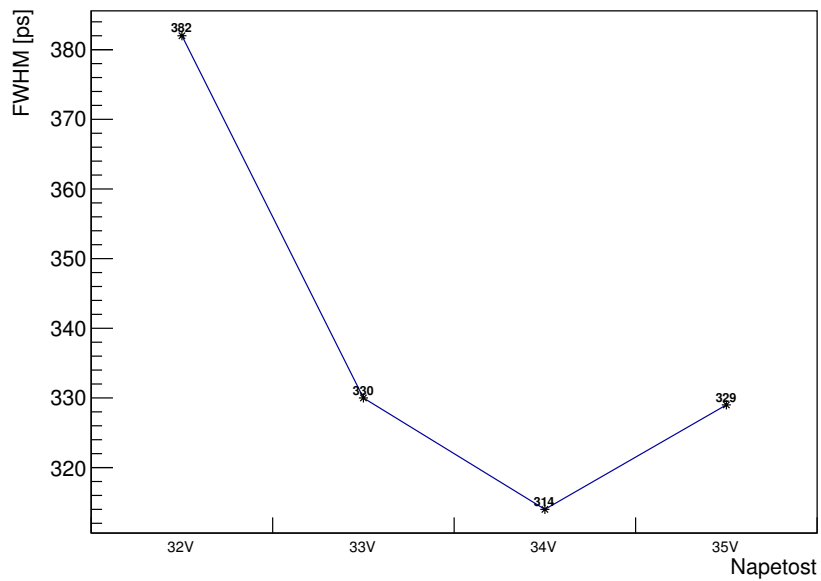




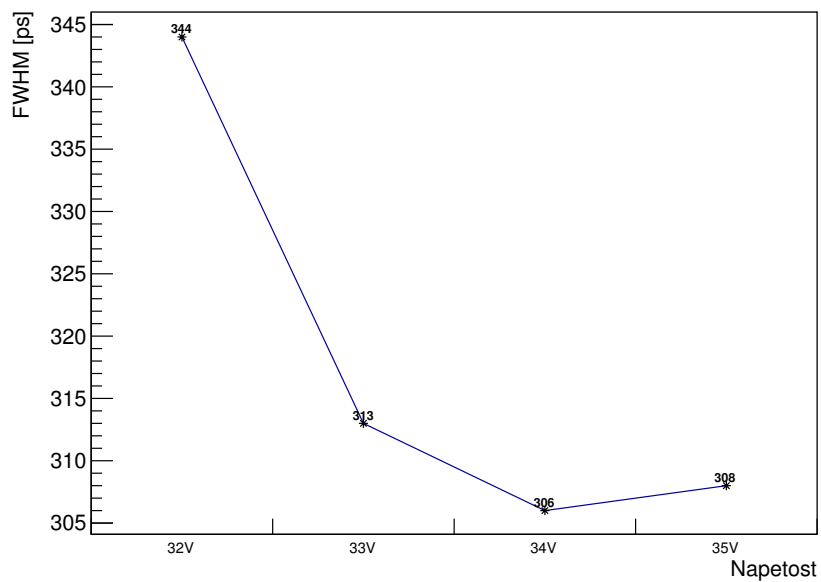
Slika 5.11: Časovna ločljivost silicijeve pomnoževalke PM1125 v odvisnosti od napetosti.



Slika 5.12: Časovna ločljivost silicijeve pomnoževalke PM3315 v odvisnosti od napetosti.



Slika 5.13: Časovna ločljivost silicijeve pomnoževalke PM3335 v odvisnosti od napetosti.

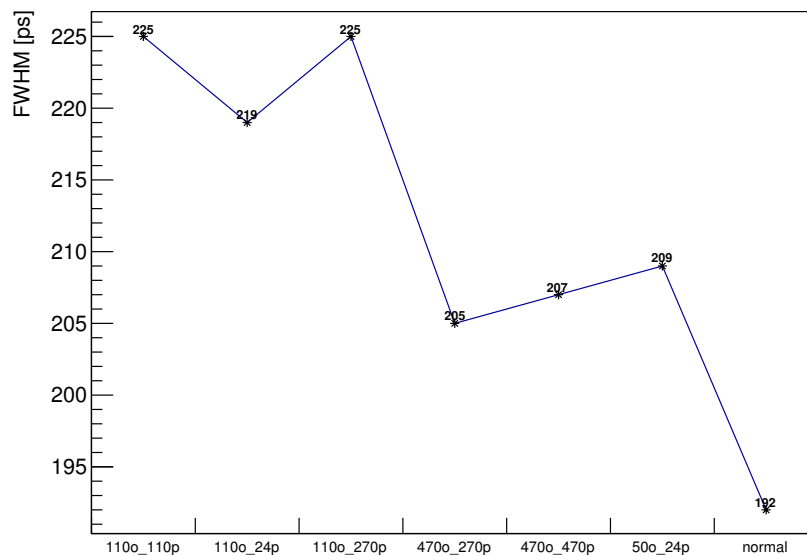


Slika 5.14: Časovna ločljivost silicijeve pomnoževalke PM3347 v odvisnosti od napetosti.

### 5.2.3 Uporaba kompenzatorja v merilnem sistemu

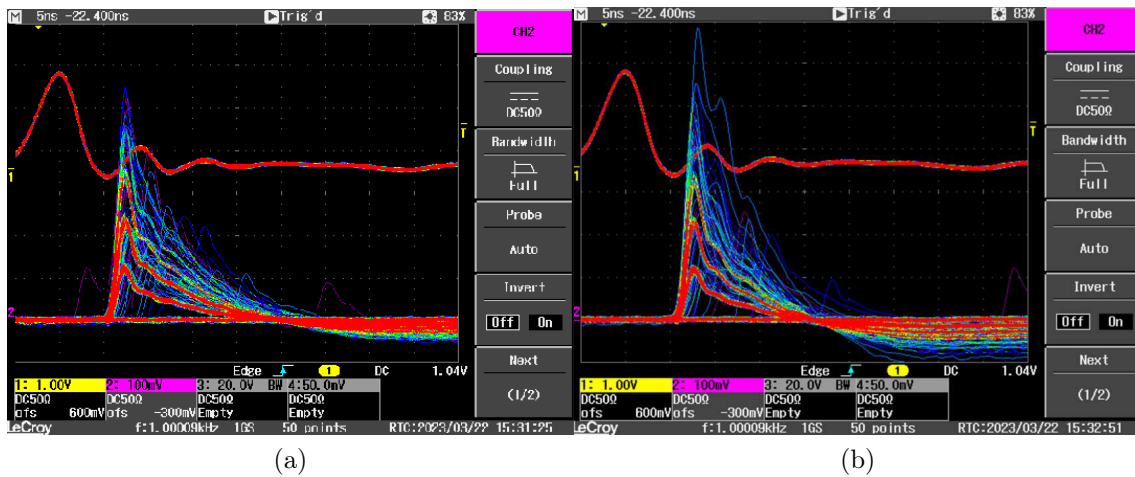
Pri meritvi oblike signala in časovne ločljivosti je ojačevalac ključnega pomena. Med eksperimentom smo zato na konec merilnega sistema in pred DRS4 vstavili vzporedno vezavo upora in kondenzatorja – vezava ima vlogo kompenzatorja. Namen kompenzatorja je, da pomnoževanje ojačevalca sicer rahlo zmanjša, vendar pa se s tem poveča pasovna širina ojačevalca. S spreminjanjem vrednosti upora in kondenzatorja lahko preizkusimo, katera kombinacija vrednosti spremeni obliko signala in s tem morebiti izboljša časovno ločljivost.

Meritve s kompenzatorjem so potekale z ojačevalcem amp4ch, ki se je med izbranimi ojačevalci (glej tabelo 4.2) izkazal za najbolj zanesljivega. Po rezultatih, prikazanih v grafu 5.15, lahko sklepamo, da nobena od kombinacij ne pripomore k izboljšanju rezultata: oblika signala se nekoliko spremeni (glej sliko 5.16, ostale slike so v dodatku B), a obenem se poslabša časovna ločljivost.

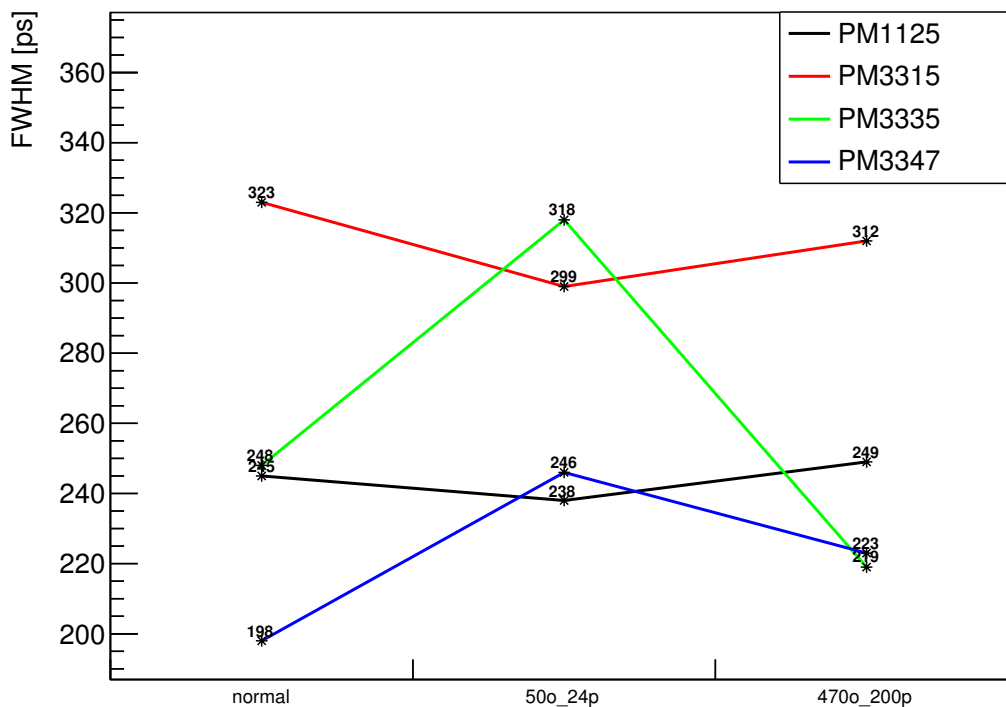


Slika 5.15: Časovna ločljivost pri meritvah s kompenzatorjem za PM1125 pri napetosti 39 V. Vrednosti komponent kompenzatorja smo spreminjali, na razpolago pa smo imeli upore 470  $\Omega$ , 110  $\Omega$  in 50  $\Omega$ , ter kondenzatorje 470 pF, 270 pF, 110 pF in 24 pF. Oznake na x osi predstavljajo izbrane vrednosti v kompenzatorju, oznaka “normal” predstavlja meritev brez kompenzatorja.

Pri nekaterih KETEK-ovih silicijevih fotopomnoževalkah je časovna ločljivost boljša za določeno kombinacijo vrednosti upora in kondenzatorja (glej sliko 5.17). Ta izboljšava je majhna, nepredvidljiva in odvisna od posameznega SiPM, zato kompenzatorja kot obvezni del merilnega sistema ni smiselno vpeljati – boljše bi bilo izboljšati osnovni ojačevalac.



Slika 5.16: Primer oblike signala za PM1115 pri napetosti 39 V brez in s kompenzatorjem. a) je signal brez kompenzatorja, b) pa je signal s kompenzatorjem (vrednosti komponent:  $R = 470 \Omega$ ,  $C = 470 \text{ pF}$ ). Vidi se, da je signal malce krajši in da so repi med seboj bolj ločeni.

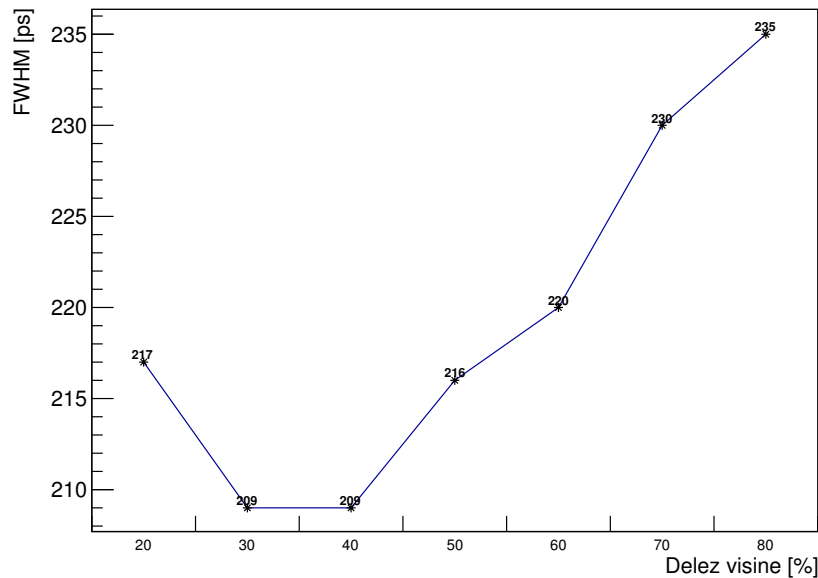


Slika 5.17: Časovna ločljivost za SiPM proizvajalca KETEK, merjene skupaj s kompenzatorjem za dve vrednosti:  $50 \Omega$  in  $24 \text{ pF}$  ter  $470 \Omega$  in  $200 \text{ pF}$ . Oznaka “normal” predstavlja meritev brez kompenzatorja. Meritve so bile narejene s PM1125 pri napetosti 31 V, PM3315, PM3335 in PM3347 pa pri 36 V.

### 5.2.4 Primerjava analiznih korakov

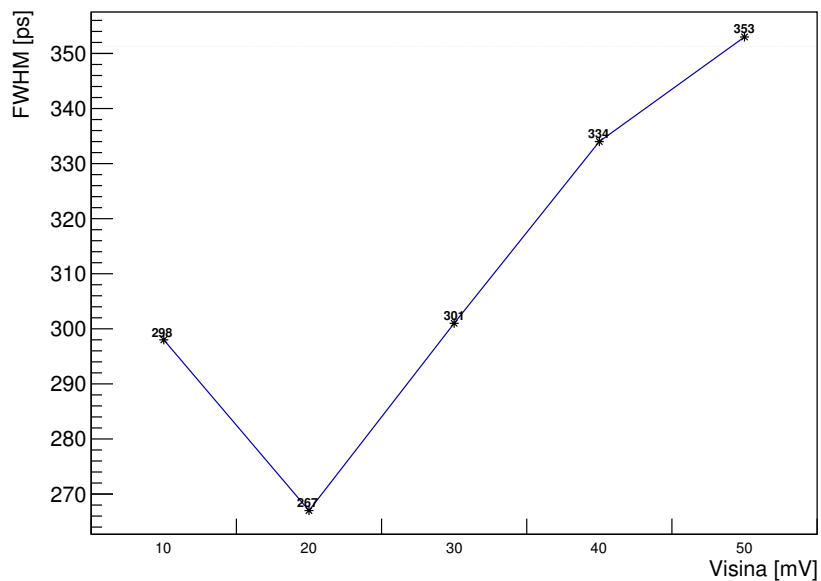
Vse nadaljnje meritve so bile izmerjene z ojačevalcem amp4ch – nekatere s PM1125 proizvajalca KETEK, preostale pa s PM1115 proizvajalca FBK.

Pri analizi smo za določanje časovne ločljivosti izbrali metodo diskriminacije pri konstantnem deležu višine pri vrednosti 40 %. Na tej višini pričakujemo največjo strmino prednjega roba. To izbiro upravičuje tudi spodnji graf 5.18. Obenem je na grafu 5.19 prikazano, da so rezultati pri računanju po metodi diskriminacije pri konstantni višini slabši, kar utemeljuje našo odločitev za diskriminacijo pri konstantnem deležu višine.

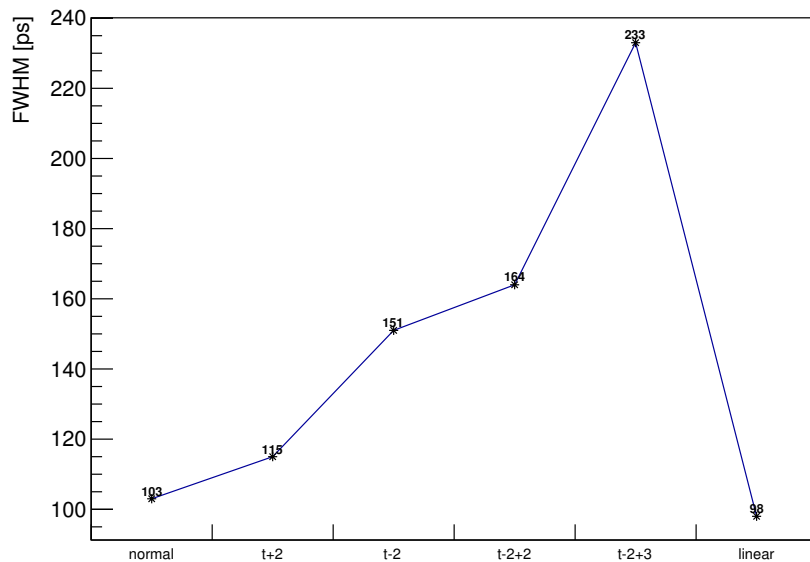


Slika 5.18: Časovna ločljivost izračunana po metodi diskriminacije pri konstantnem deležu višine. Najboljšo časovno ločljivost dobimo pri meritvi na 40 %, kar potrди začetno izbiro te vrednosti. Analiza je bila opravljena na meritvi PM1125 pri napetosti 28 V.

Časovno ločljivost smo določali iz časovnih točk, kjer je signal prečkal vnaprej določeno višino (40 % višine signala). To smo določili kot linearno interpolacijo med točkama, ki se nahajata direktno pod in nad to višino. Graf 5.20 prikazuje, kaj se zgodi, če interpolacijo naredimo med drugimi točkami (npr. oznaka “t+2” pomeni točko direktno pod mejo in drugo zaporedno točko nad mejo, “t-2” pa točko direktno nad mejo in drugo zaporedno točko pod mejo). Bolj kot sta točki narazen, slabši je končni rezultat. Vendar pa lahko vzamemo določeno število točk na prednjem robu signala (v našem primeru smo vzeli 5 točk, dve pod mejo in tri nad mejo) in na njih izvedemo linearno regresijo. Časovno točko v tem primeru določimo na nastali premici, kjer ta seka izbrano višino signala.

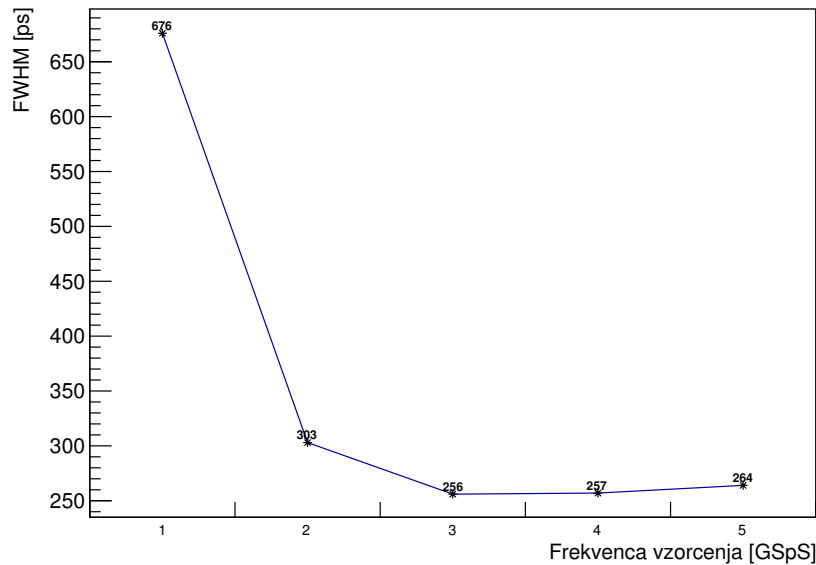


Slika 5.19: Časovna ločljivost izračunana po metodi diskriminacije pri konstantni višini. Višina dogodkov z enim fotonom je 55 mV, zato lahko izbiramo samo med vrednostmi, manjšimi od te. Naboljša časovna ločljivost je pri višini 20 mV, kar je  $\sim 36\%$  višine – tudi ta metoda potrjuje, da je izbira višine povezana z naklonom prednjega roba – bolj strm prednji rob bo omogočal bolj natančno določanje časovne točke. Analiza je bila opravljena na meritvi PM1125 pri napetosti 28 V.



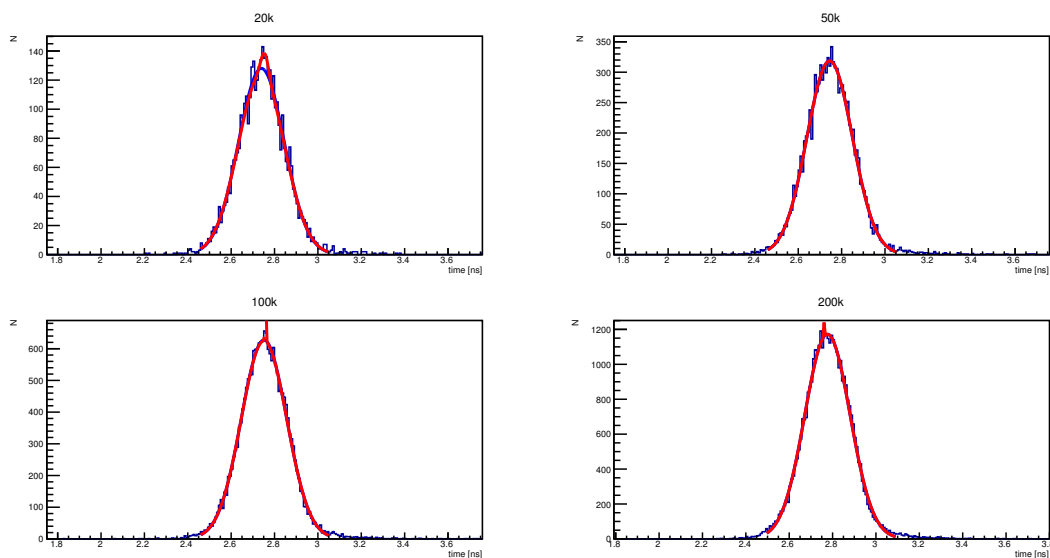
Slika 5.20: Vpliv različnih izbir določanja časovne točke na končni rezultat. Analiza je bila izvedena na meritvi PM1115 pri napetosti 39 V. Oznaka “normal” pomeni točki neposredno ob meji, “linear” pa linearno regresijo na pet izbranih točk.

Na začetku eksperimenta smo vse meritve opravili pri frekvenci vzorčenja 2 GSpS. Kasnejše meritve so bile zajete pri 5 GSpS, kar omogoča krajše časovno okno zajemanja – s tem smo zmanjšali vnos neželenih dogodkov (dogodkov, ki se niso sprožili zaradi prispelega fotona), ostalo pa je več točk za opis signala, ki nas zanima.



Slika 5.21: Sprememba časovne ločljivosti pri različnih frekvencah vzorčenja DRS4. Meritev je bila narejena s PM1125 pri napetosti 28 V.

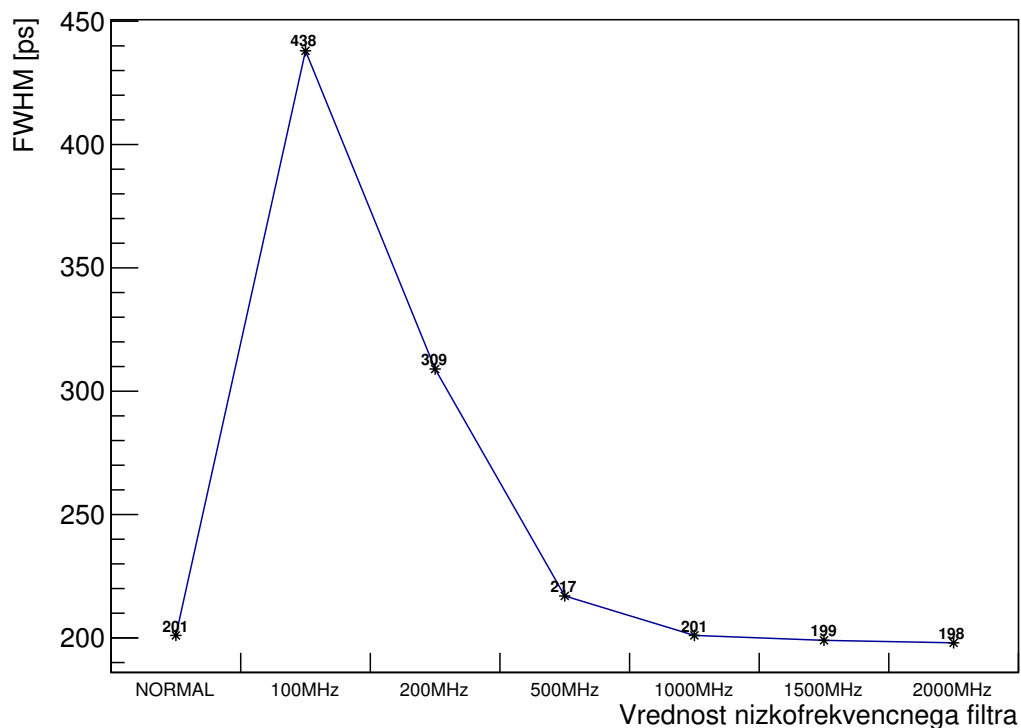
Vse meritve smo analizirali s prileganjem dvojne Gaussove funkcije na histogram časovnih točk – z določanjem FWHM smo tako dobili časovno ločljivost izbrane SiPM. Čeprav pričakujemo, da so časovne točke porazdeljene po enojni Gaussovi funkciji, smo zaradi boljšega prileganja na meritve izbrali dvojno Gaussovo funkcijo. Pri zajemanju večjega števila dogodkov se porazdelitev medtem vedno bolj približuje enojni Gaussovi funkciji. Na sliki 5.22 vidimo, da se pri meritvah z večjim številom dogodkov prileganje enojne in dvojne Gaussove krivulje v delu, ki nas zanima (osnovna Gaussova krivulja), ne razlikuje. Pri prileganju dvojne Gaussove funkcije ena Gaussova funkcija prevzame prileganje na podatke, druga pa se na podatke prilega samo v delih histograma, ki od osnovne oblike Gaussove funkcije odstopajo. Torej lahko sklepamo, da je uporaba dvojne Gaussove krivulje upravičena pri manjšem številu dogodkov (za popravljanje prileganja), pri večjem številu pa se časovne točke statistično bolj prilegajo Gaussovi porazdelitvi.



Slika 5.22: Prileganje Gaussove in dvojne Gaussove funkcije za meritve z različnim številom zajetih dogodkov. Meritve so bile narejene s PM1125 pri napetosti 28 V. Nad grafi je označeno, pri katerem številu dogodkov je bila meritev zajeta. Tu so navedene primerjave FWHM za prileganje enojne ( $\text{FWHM}_1$ ) in dvojne Gaussove krivulje ( $\text{FWHM}_2$ ). 20k:  $\text{FWHM}_1 = 248$  ps,  $\text{FWHM}_2 = 230$  ps; 50k:  $\text{FWHM}_1 = 247$  ps,  $\text{FWHM}_2 = 234$  ps; 100k:  $\text{FWHM}_1 = 238$  ps,  $\text{FWHM}_2 = 246$  ps; 200k:  $\text{FWHM}_1 = 243$  ps,  $\text{FWHM}_2 = 243$  ps



V analizi smo na signalu SiPM uporabili nizkofrekvenčni filter različnih vrednosti. Filter je vgrajen v programsko orodje Python, ki smo ga pognali skupaj z našim analiznim programom, napisanem v ROOT-u. Namen filtra je zmanjšati vpliv visokofrekvenčnih motenj, ki se jim med zajemanjem dogodkov ne moremo izogniti in se v grafu signala izražajo kot nihanja v osnovni obliki signala. Uporaba filtra je signal pogladila, vendar izboljšave časovne ločljivosti ni mogoče opaziti. Nizkofrekvenčni filter za vrednosti relativno nizkih frekvenc (npr. 100 MHz) signal pogladi prekomerno – to se izrazi v manjši strmini prednjega roba signala, ki pa je za dobro časovno ločljivost ključna. Pri večjih vrednostih filtra se strmina res ne poslabša, vendar pa se visokofrekvenčna nihanja ne pogladijo – zato je izboljšava časovne ločljivosti zanemarljiva.



Slika 5.23: Časovna ločljivost pri uporabi nizkofrekvenčnega filtra na signalu SiPM. Analiza je bila narejena na meritvi PM1125 pri napetosti 28 V.

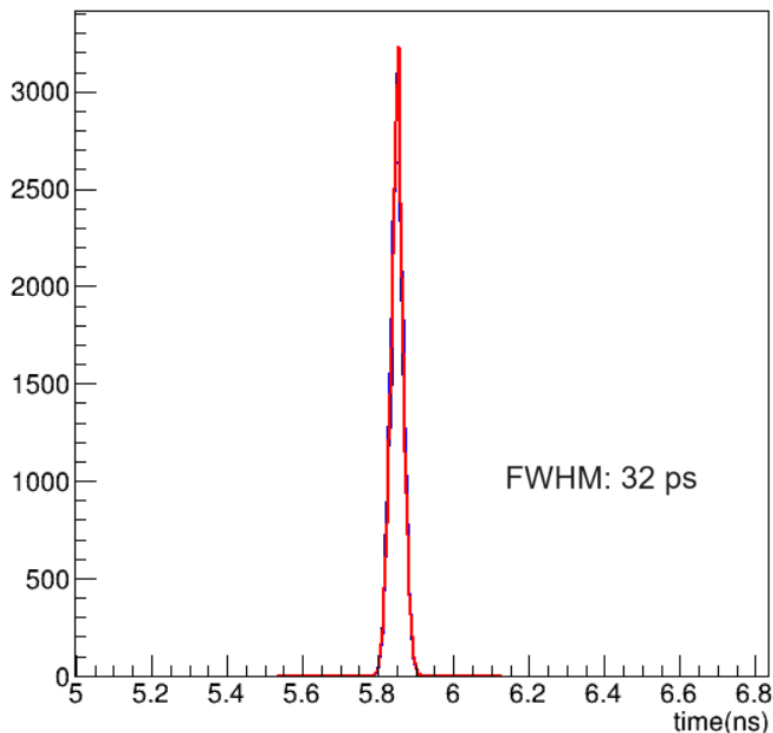
## Poglavje 5. Potek eksperimenta in rezultati

---

Pri končnem rezultatu časovne ločljivosti je treba upoštevati tudi časovno natančnost merilne elektronike – DRS4. To smo izmerili v prispevku natančnosti z meritvijo dveh enakih signalov iz laserja. To bi potem morali upoštevati pri računanju časovne ločljivosti SiPM po enačbi:

$$\sigma_{meritev}^2 = \sigma_{laser}^2 + \sigma_{elektronika}^2 + \sigma_{SiPM}^2. \quad (5.1)$$

S slike 5.24 vidimo, da je izmerjena časovna ločljivost DRS4 32 ps. Navedena časovna ločljivost laserja je 25 ps.



Slika 5.24: Časovna ločljivost DRS4.

Natančnost meritve z DRS4 je omejena pri njegovi meritvi napetosti in časa – analogni signal se zapise v celice, ki so določene z bitno velikostjo čipa. DRS4 je 11-bitni; to nam omejuje natančnost določanja napetosti na  $\sim 0,4$  mV (ker imamo 2048 celic, ki tako razdelijo interval 1 V), in natančnost določanja časa pri 5 GSpS na  $\sim 0,1$  ns.

## 6. Zaključek

Cilj predstavljenega eksperimenta in analize v njem pridobljenih podatkov je bil ugotoviti, ali in kako je mogoče optimizirati merjenje časovne ločljivosti pri uporabi SiPM. V splošnem lahko ugotovimo, da na zanesljivost pri določanju časovne ločljivosti pozitivno vplivajo:

- kvaliteta merilnega sistema, zlasti ojačevalca;
- izoliranost merilnega sistema od okolice;
- pogostost zajemanja dogodkov med eksperimentom;
- (pri analizi podatkov) izbira ustrezne metode za določanje časovne točke (linearna regresija prispeva k natančnosti).

Negativen oz. nepredvidljiv vpliv ima medtem lahko uporaba kompenzatorja, ker je težko zanesljivo določiti, katere vrednosti komponent bi na izboljšanje časovne ločljivosti dejansko vplivale.

Pri nadaljnjih meritvah bi bilo verjetno smiselno dodatno preučiti vlogo in vpliv kompenzatorja, ki je bil v našem eksperimentu dodan šele pozneje, kar je pomenilo tudi manjše število izvedenih meritev. Prav tako bi bilo v okviru analize čim več dejavnikov s potencialnim vplivom na meritve treba upoštevati odvisnost lastnosti polprevodniških detektorjev od temperature, ki je bila v našem eksperimentu zanemarjena.

Po izvedeni analizi menimo, da bodo nadaljnje izboljšave časovne ločljivosti silicijevih fotopomnoževalk bolj odvisne od kvalitete in nadgradnje za njihovo izdelavo uporabljenih materialov in tehnik kot pa od izboljšave samih merilnih metod in postopkov analize.

Merilni sistem je bil prilagojen za karakterizacijo posamezne silicijeve fotopomnoževalke. Za hkratno merjenje z več SiPM bi morali sistem prilagoditi, saj je poraba električnega toka za trenutni sistem velika.



## 7. Literatura

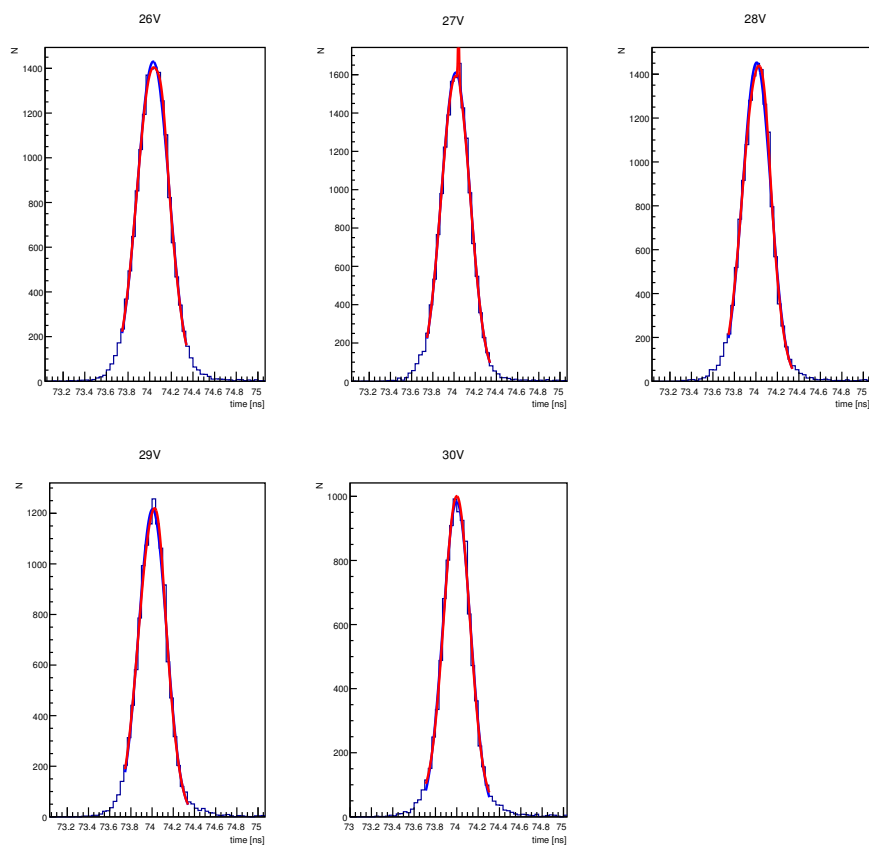
- [1] *SiPM sensor enhances LiDAR performance*, <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/sipm-sensor-enhances-lidar-performance>[junij 2024].
- [2] R. Pestotnik, *LHCb RICH Phase2 upgrade*, [http://merlot.ijs.si/~cindro/seminars/pestotnik\\_rich\\_LHCb\\_2018.pdf](http://merlot.ijs.si/~cindro/seminars/pestotnik_rich_LHCb_2018.pdf)[maj 2024].
- [3] E. Garutti, Yu. Musienko, *Radiation damage of SiPMs*, <https://arxiv.org/abs/1809.06361>[junij 2024].
- [4] G. Lutz, *Semiconductor Radiation Detectors*, (Springer, Berlin, 2007).
- [5] *The PN Junction as a Rectifier*, <https://eepower.com/technical-articles/the-p-n-junction-used-as-a-rectifier/>[avgust 2024].
- [6] *Light Detectors (PMTs and APDs): Detecting and Diagnosing Light*, <https://www.findlight.net/blog/light-detectors-detecting-and-diagnosing-light/>[maj 2024].
- [7] Hamamatsu Photonics, *PHOTOMULTIPLIER TUBES – Basics and Applications* (2006), [https://psec.uchicago.edu/links/pmt\\_handbook\\_complete.pdf](https://psec.uchicago.edu/links/pmt_handbook_complete.pdf)[julij 2024].
- [8] *PIN diode*, <https://www.electrical4u.com/pin-diode/>[junij 2024].
- [9] B. Wang, J. Mu, *High-speed Si-Ge avalanche photodiodes*, <https://photonix.springeropen.com/articles/10.1186/s43074-022-00052-6>[avgust 2024].
- [10] D. Renker, *Silicon Photomultipliers* (PSI - Beaune 2005), <http://ndip.in2p3.fr/beaune05/cdrom/Sessions/renker.pdf>[avgust 2024].
- [11] M. Ghioni, A. Gulinatti, I. Rech, P. Maccagnani, S. Cova, *Large-area low-jitter silicon single photon avalanche diodes*, [https://www.researchgate.net/publication/253351779\\_Large-area\\_low-jitter\\_silicon\\_single\\_photon\\_avalanche\\_diodes](https://www.researchgate.net/publication/253351779_Large-area_low-jitter_silicon_single_photon_avalanche_diodes)[julij 2024].
- [12] N. Dinu, A. Nagai, A. Para, *Breakdown voltage and triggering probability of SiPM from IV curves at different temperatures*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216305125>[julij 2024].

- [13] F. Acerbi, G. Paternoster, S. Merzi, N. Zorzi, A. Gola, *NUV and VUV sensitive Silicon Photomultipliers technologies optimized for operation at cryogenic temperatures*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900222009755>[maj 2024].
- [14] A. Mazzi, *SiPM development at FBK for highly irradiated environments* (VERTEX 2021), Alberto Mazzi VERTEX 2021[maj 2024].
- [15] M.V. Nemallapudi, S. Gundacker, P. Lecoq, E. Auffray, *Single photon time resolution of state of the art SiPMs*, [https://cds.cern.ch/record/2255812/files/Nemallapudi\\_2016\\_J.\\_Inst.\\_11\\_P10016.pdf](https://cds.cern.ch/record/2255812/files/Nemallapudi_2016_J._Inst._11_P10016.pdf)[julij 2024].
- [16] Y. Yang, G. Zhang, C. Zhang, X. Cao, L. Liu, L. Li, X. Han, *Measurement of focal light spot at single-photon level with silicon photomultipliers*, <https://www.nature.com/articles/s41598-022-17759-y>[julij 2024].
- [17] S. Gundacker et al., *SiPM time resolution: From single photon to saturation*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213001393>[avgust 2024].
- [18] A. R. Altamura, F. Acerbi, C. Nociforo, V. Regazzoni, A. Mazzi, A. Gola, *Characterization of Silicon Photomultipliers after proton irradiation up to  $10^{12}$   $n_{eq}/mm^2$* , <https://arxiv.org/abs/2106.12344>[junij 2024].
- [19] E. Margan, *Fotodiodni ojačevalniki* (Ljubljana, 2009).
- [20] *Op-Amp Frequency Compensation*, <https://circuitcellar.com/resources/quickbits/op-amp-frequency-compensation/>[avgust 2024].
- [21] *LabWindows/CVI*, What is LabWindows/CVI[avgust 2024].
- [22] *ROOT*, <https://root.cern/>[avgust 2024].
- [23] *DRS4 evaluation board*, <https://www.psi.ch/en/ltp-muon-physics/evaluation-board>[avgust 2024].
- [24] *Python SciPy*, <https://docs.scipy.org/doc/scipy/index.html>[avgust 2024].

# Dodatek A

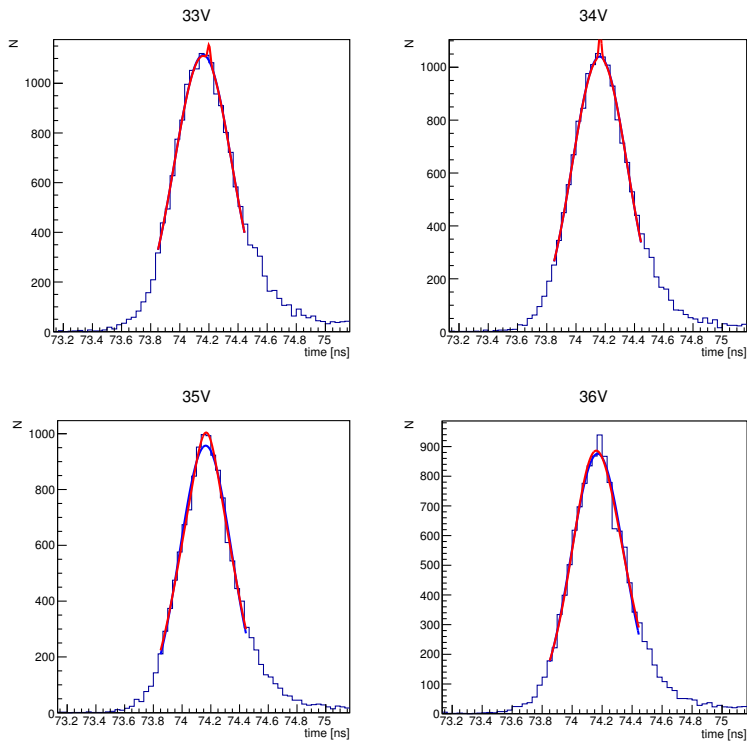
## Slike prileganj dvojne Gaussove funkcije

Tu so prikazana prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve, predstavljene v poglavju 5. Oznake nad prileganji so vrednosti meritev, katero graf prikazuje. Z rdečo so označeni grafi prileganja dvojne, z modro pa prileganja enojne Gaussove funkcije.

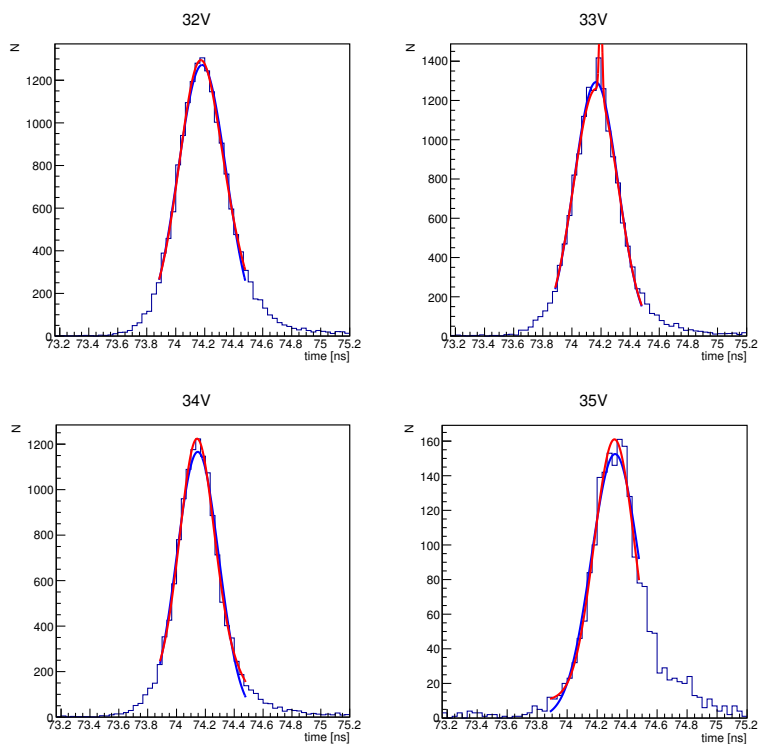


Slika A.1: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM1125 pri napetostih od 26 do 30 V.

## Dodatek A. Slike prileganj dvojne Gaussove funkcije

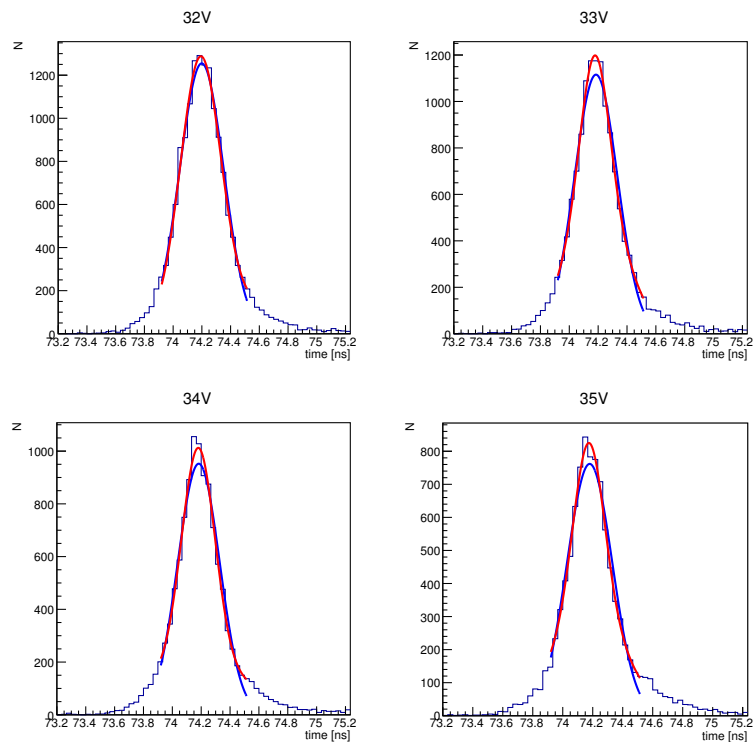


Slika A.2: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3315 pri napetostih od 33 do 36 V.

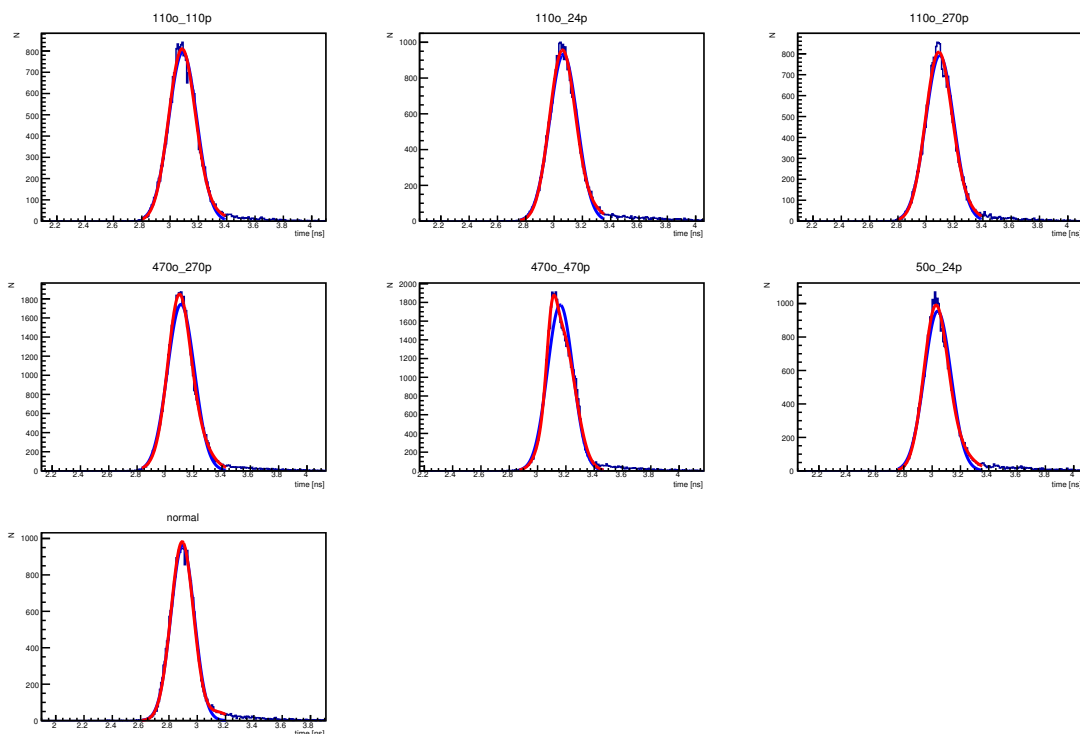


Slika A.3: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3335 pri napetostih od 32 do 35 V.



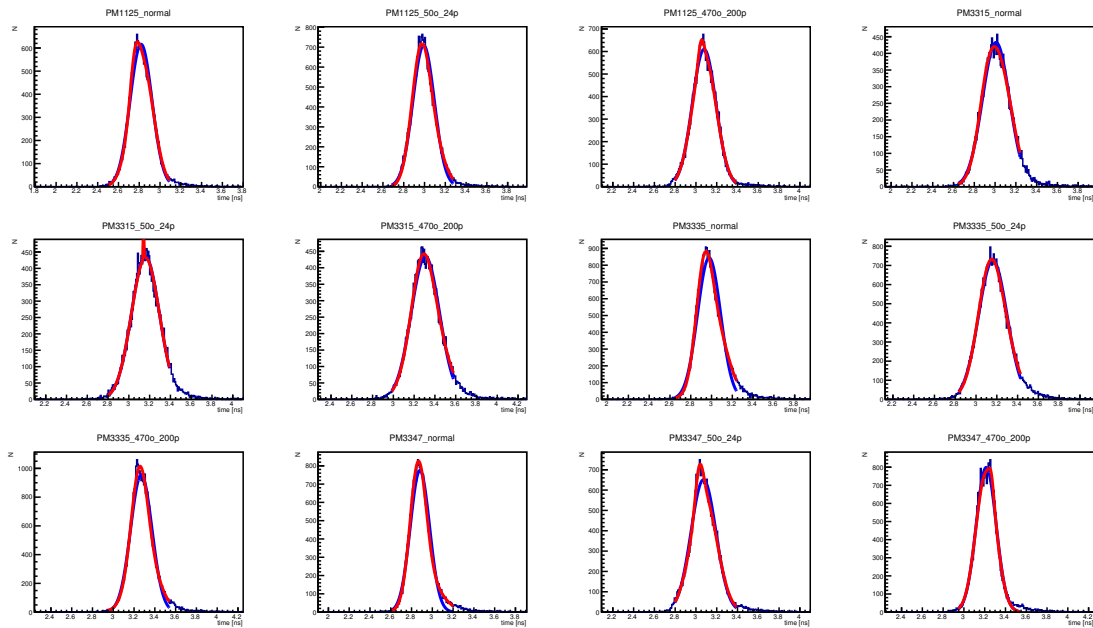


Slika A.4: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti za PM3347 pri napetostih od 32 do 35 V.

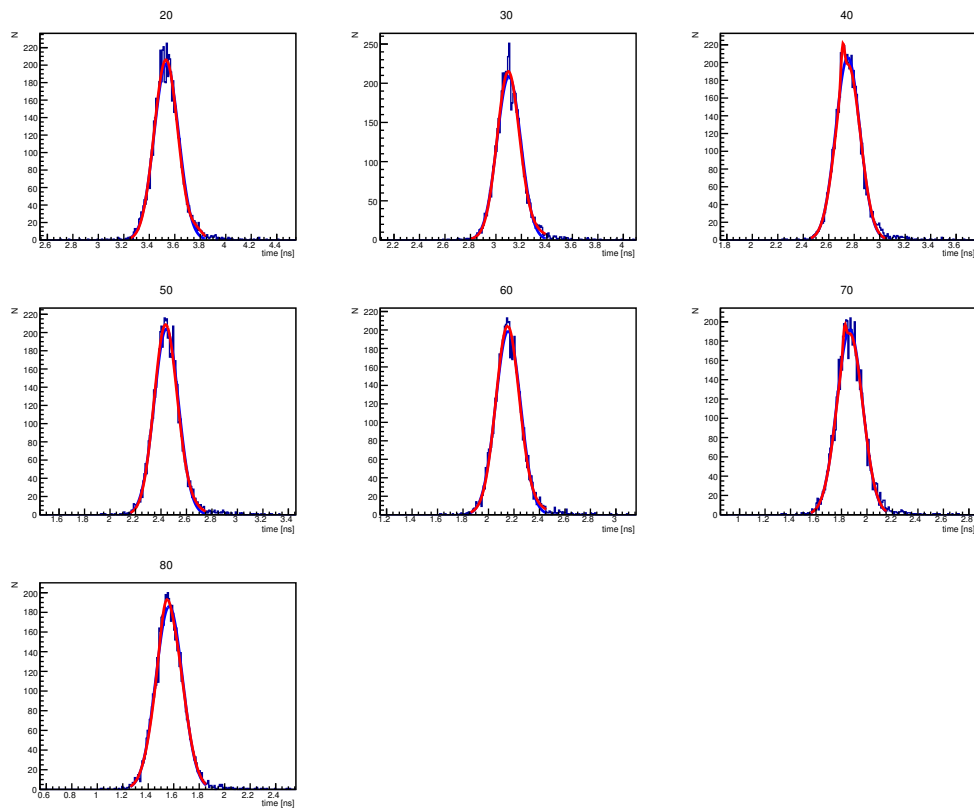


Slika A.5: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednosti komponent kompenzatorja za PM1115 pri napetosti 39 V. Nad grafi so zapisane vrednosti komponent kopmpenzatorja (npr. “110o\_24p” pomeni  $R = 110 \Omega$  in  $C = 24 \text{ pF}$ , oznaka “normal” pa predstavlja meritev brez kompenzatorja).

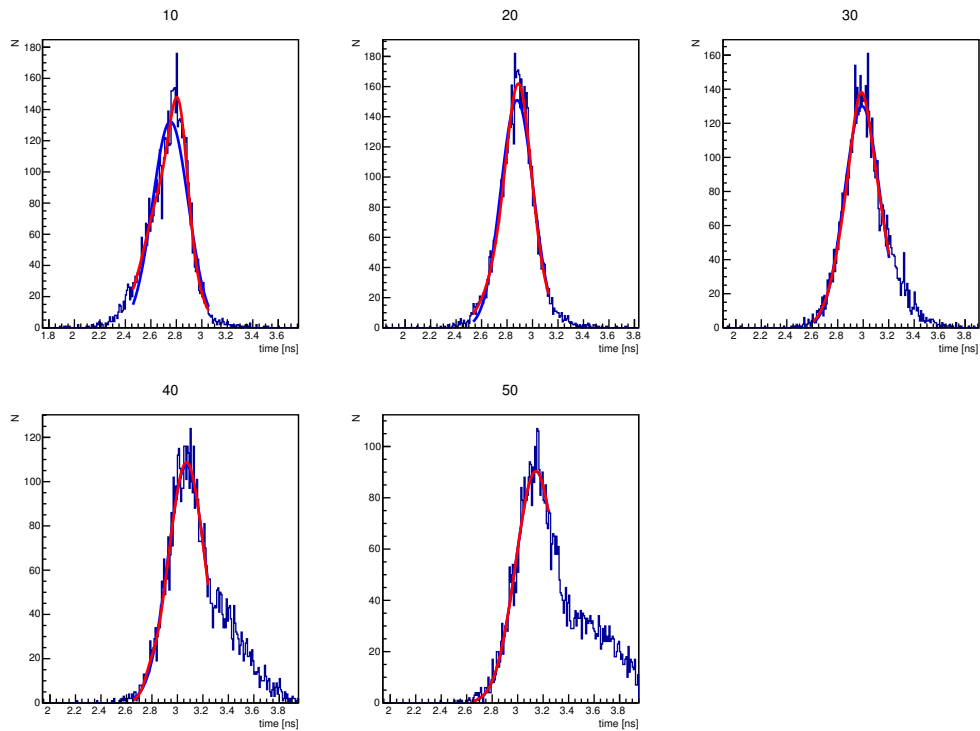
## Dodatek A. Slike prileganj dvojne Gaussove funkcije



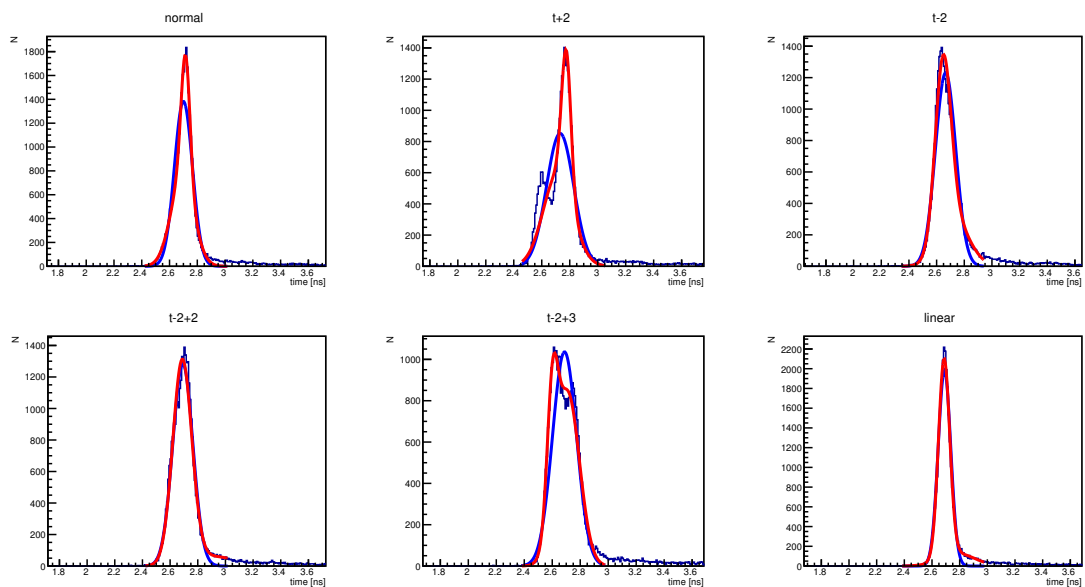
Slika A.6: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednosti komponent kompenzatorja za SiPM proizvajalca KE-TEK. Nad grafi so poleg izbrane SiPM zapisane vrednosti komponent kompenzatorja (npr. “50o\_24p” pomeni  $R = 50 \Omega$  in  $C = 24 \text{ pF}$ , oznaka “normal” pa predstavlja meritev brez kompenzatorja).



Slika A.7: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih višin metode diskriminacije pri konstantnem deležu višine. Nad grafi so napisani deleži višine v %.

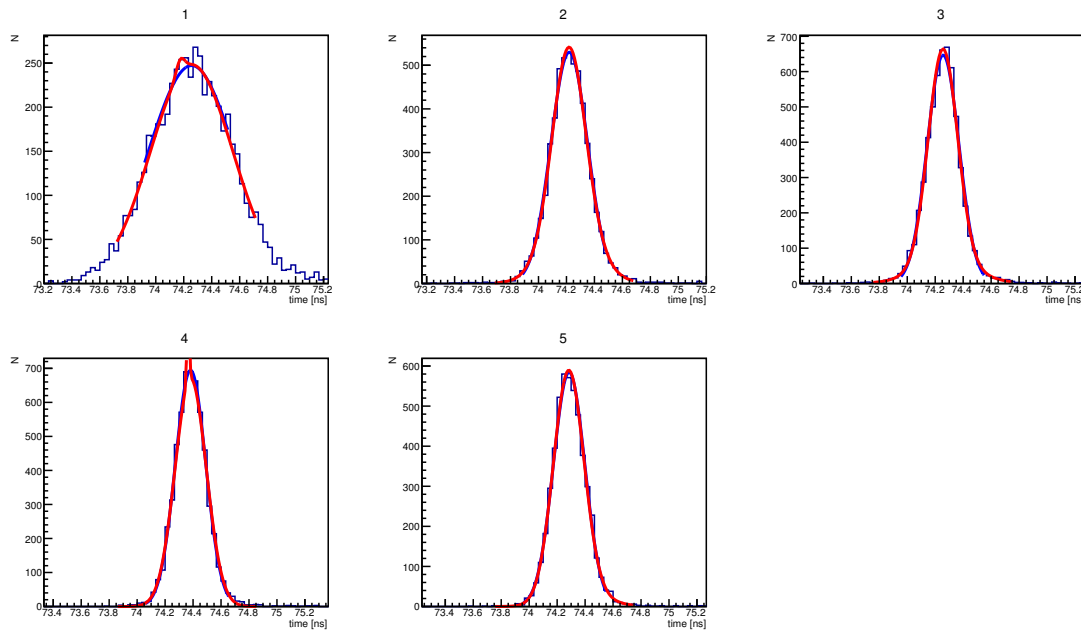


Slika A.8: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih višin metode diskriminacije pri konstantni višini. Nad grafi so napisane izbrane višine v mV pri meritvi.

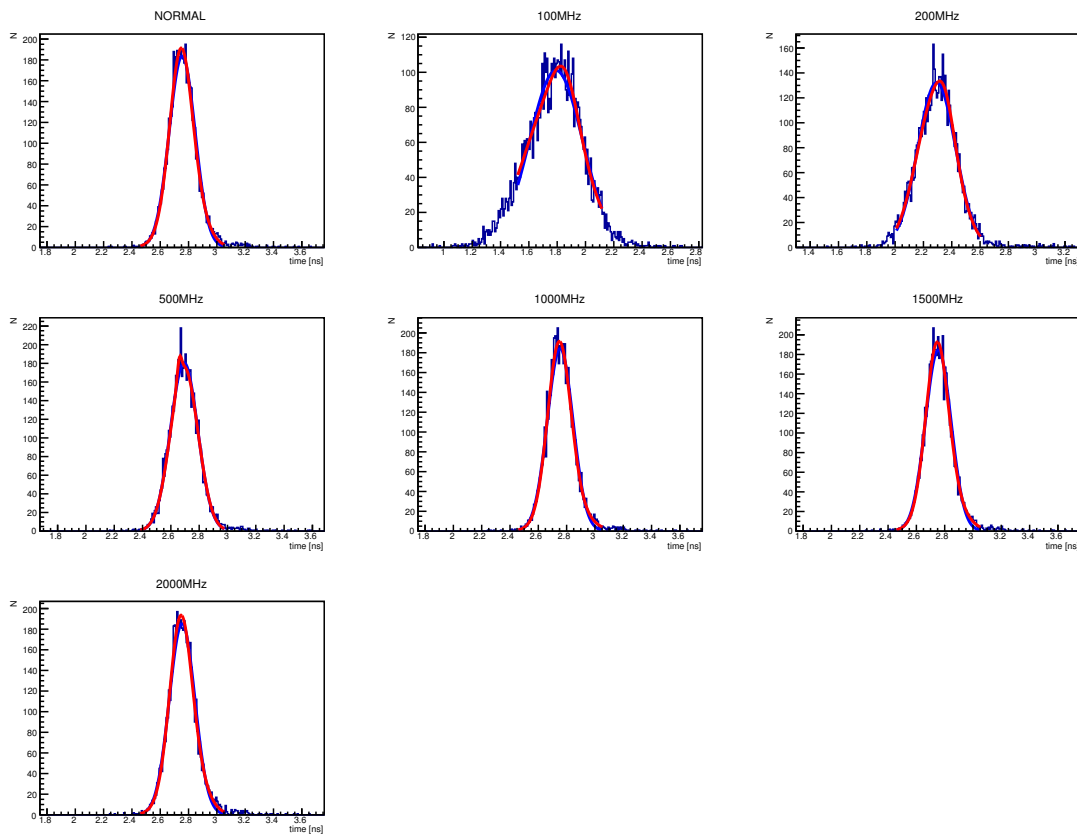


Slika A.9: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih načinov za določanje časovne točke prihoda signala SiPM. Nad grafi so oznake izbranih točk za linearno interpolacijo (npr. oznaka “normal” pomeni običajno izbiro točk – obe takoj ob meji, oznaka “t+2” pomeni točko direktno pod mejo in drugo zaporedno točko nad mejo, oznaka “linear” pa predstavlja meritev, pri kateri smo naredili linearno regresijo na petih točkah).

## Dodatek A. Slike prileganj dvojne Gaussove funkcije



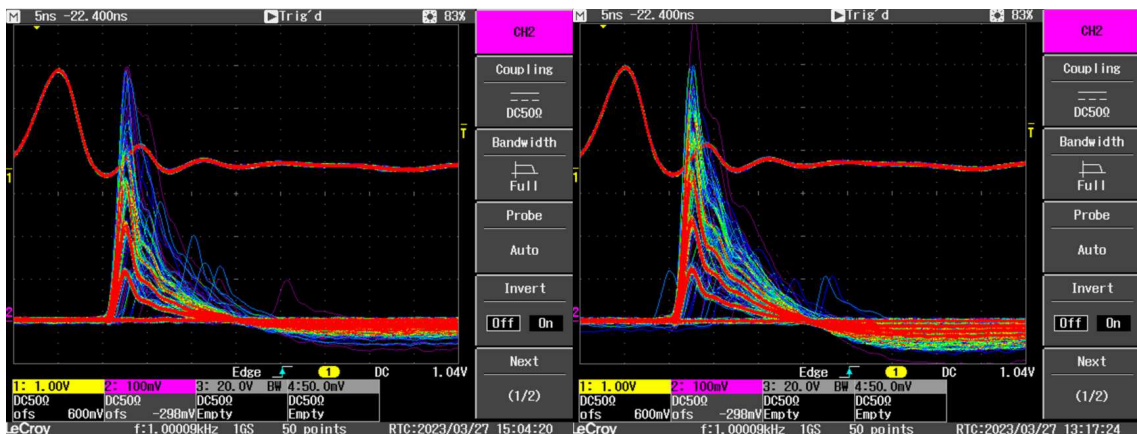
Slika A.10: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih frekvencah vzorčenja DRS4 v enotah GSpS.



Slika A.11: Prileganja dvojne Gaussove funkcije na meritve časovne ločljivosti pri primerjavi različnih vrednostih nizkofrekvenčnega filtra. Nad grafi so navedene vrednosti filtra; oznaka normal pomeni meritev brez filtra.

## Dodatek B

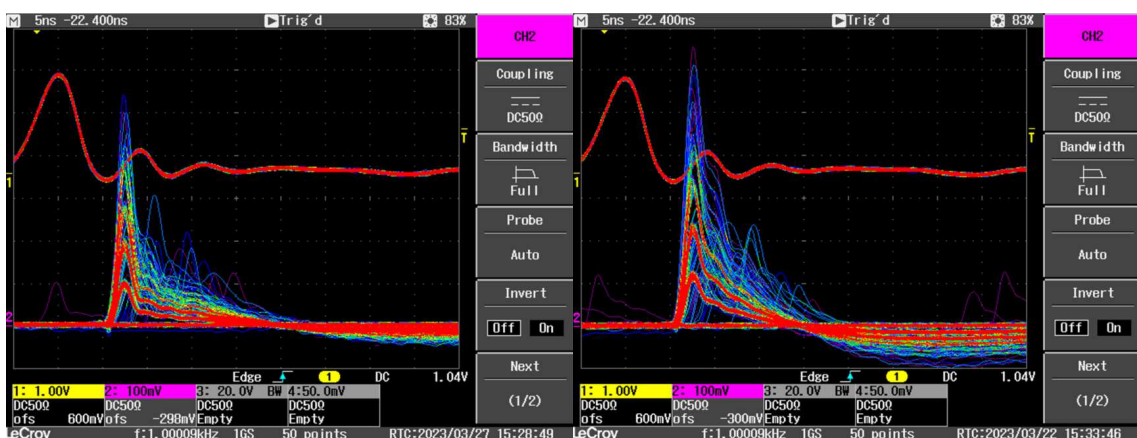
# Primerjave oblike signalov pri ojačevanju s kompenzatorjem



(a) 110  $\Omega$  in 110 pF

(b) 110  $\Omega$  in 270 pF

Slika B.1: Oblike signalov pri meritvi PM1115 pri napetosti 39 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.

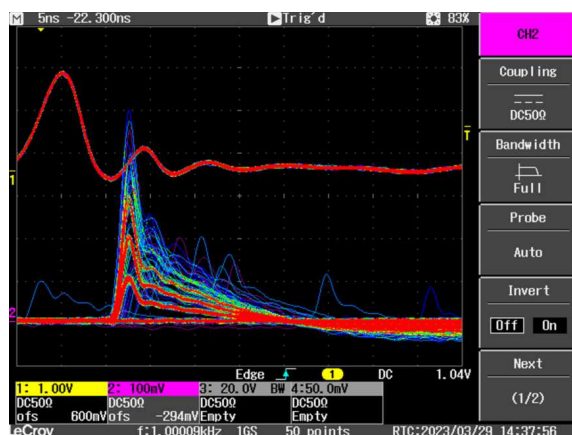


(a) 110  $\Omega$  in 24 pF

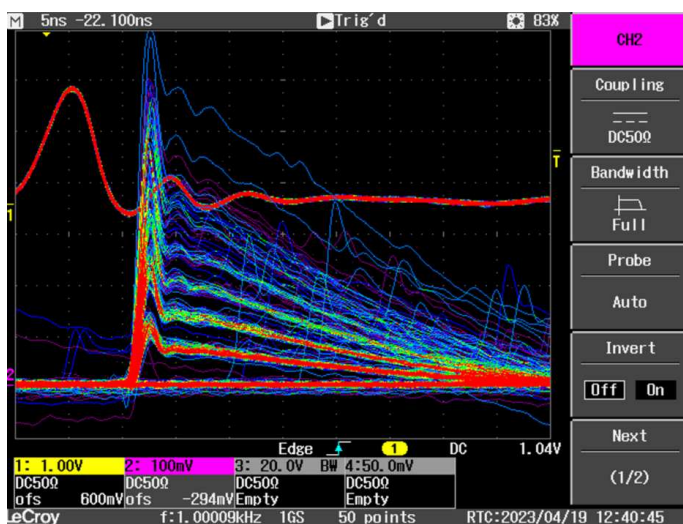
(b) 400  $\Omega$  in 270 pF

Slika B.2: Oblike signalov pri meritvi PM1115 pri napetosti 39 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.

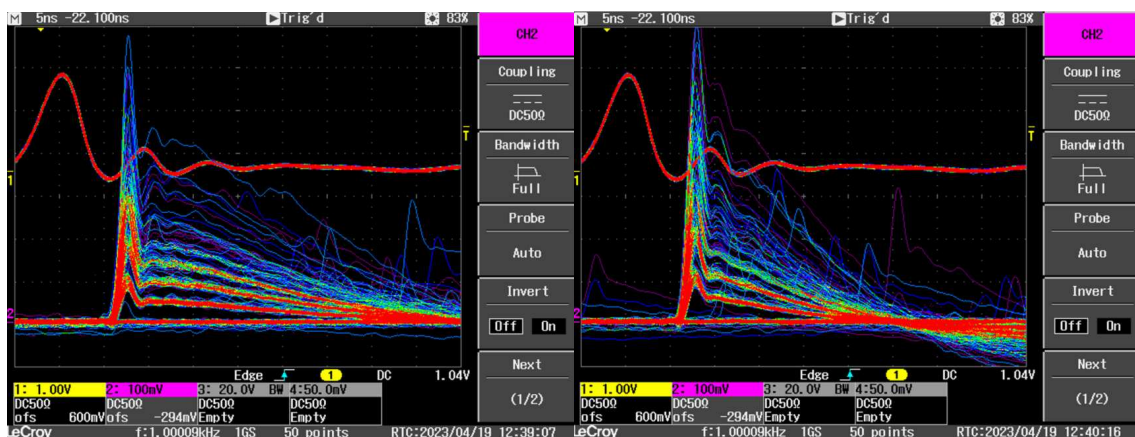
## Dodatek B. Primerjave oblike signalov pri ojačevanju s kompenzatorjem



Slika B.3: Oblike signalov pri meritvi PM1115 pri napetosti 39 V s kompenzatorjem vrednosti 50  $\Omega$  in 24 pF.



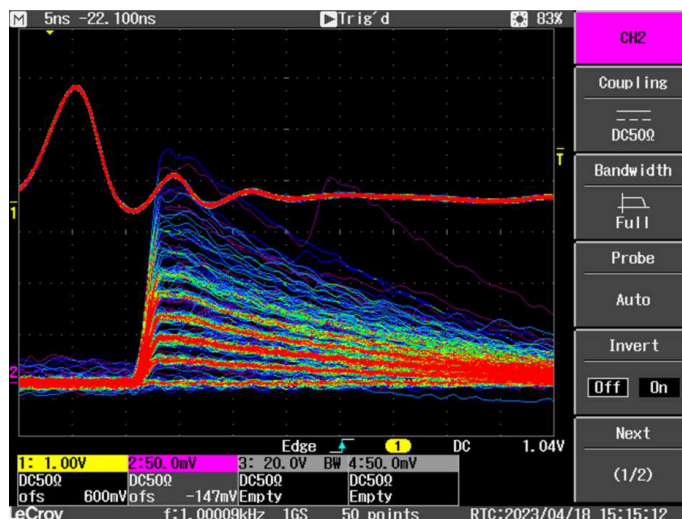
Slika B.4: Oblika signala pri meritvi PM1125 pri napetosti 31 V brez kompenzatorja.



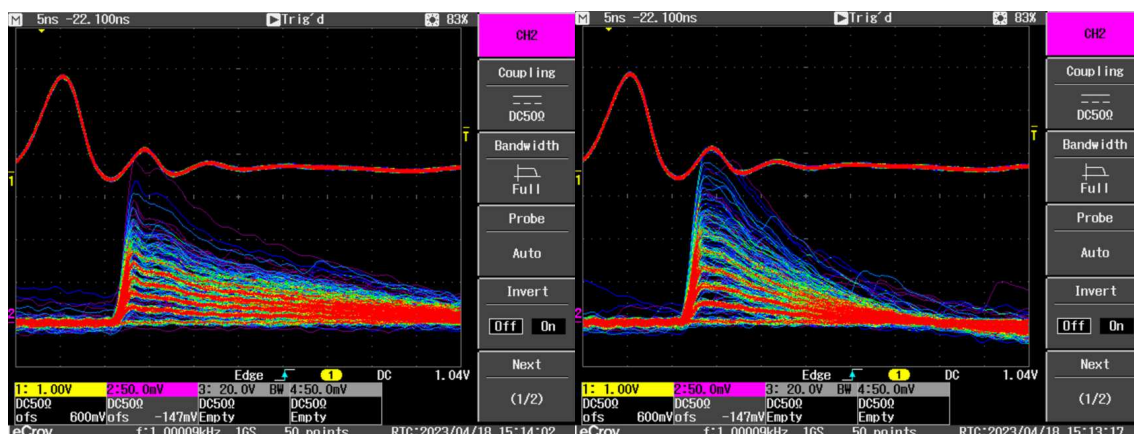
(a) 50  $\Omega$  in 24 pF

(b) 470  $\Omega$  in 200 pF

Slika B.5: Oblike signalov pri meritvi PM1125 pri napetosti 31 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.



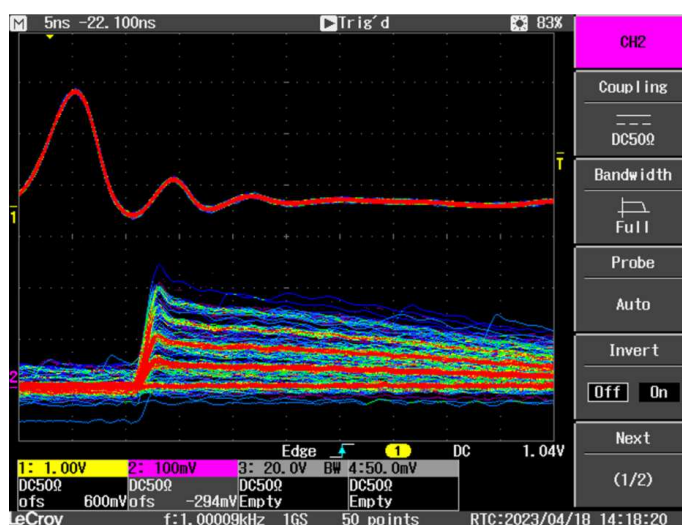
Slika B.6: Oblika signala pri meritvi PM3315 pri napetosti 36 V brez kompenzatorja.



(a) 50  $\Omega$  in 24 pF

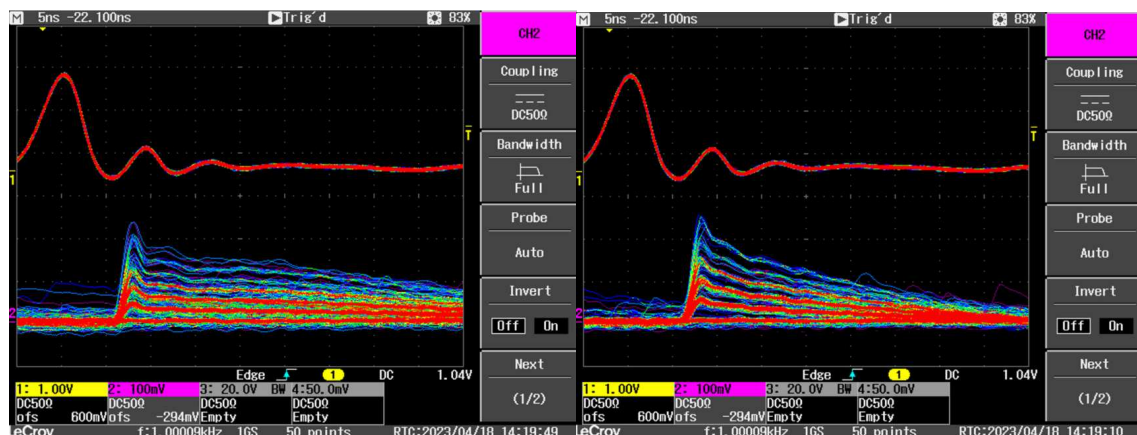
(b) 470  $\Omega$  in 200 pF

Slika B.7: Obliki signalov pri meritvi PM3315 pri napetosti 36 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.



Slika B.8: Oblika signala pri meritvi PM3335 pri napetosti 36 V brez kompenzatorja.

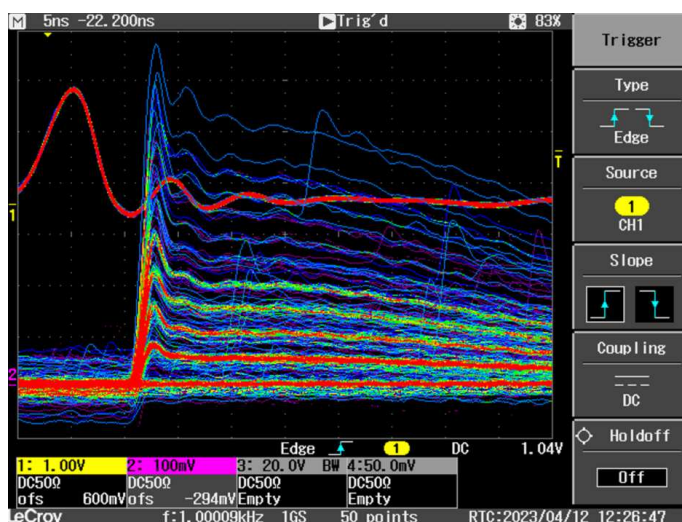
## Dodatek B. Primerjave oblike signalov pri ojačevanju s kompenzatorjem



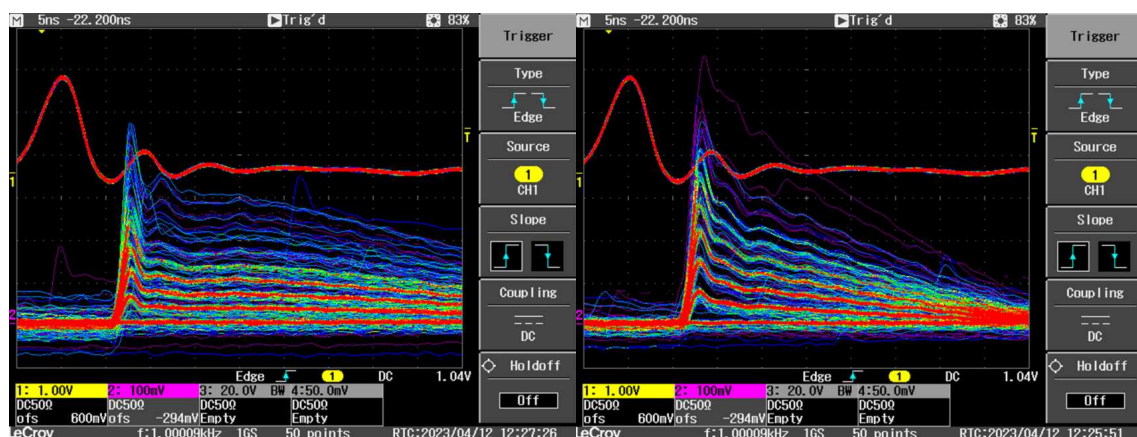
(a)  $50 \Omega$  in  $24 \text{ pF}$

(b)  $470 \Omega$  in  $200 \text{ pF}$

Slika B.9: Oblike signalov pri meritvi PM3335 pri napetosti 36 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.



Slika B.10: Oblika signala pri meritvi PM3347 pri napetosti 36 V brez kompenzatorja.



(a)  $50 \Omega$  in  $24 \text{ pF}$

(b)  $470 \Omega$  in  $200 \text{ pF}$

Slika B.11: Oblike signalov pri meritvi PM3347 pri napetosti 36 V s kompenzatorjem vrednosti, napisanima pod slikama.